



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV VODNÍCH STAVEB**

INSTITUTE OF WATER STRUCTURES

**ČASOVÝ VÝVOJ ROZLOŽENÍ RYCHLOSTI V MĚRNÉM  
PROSTORU KALIBRAČNÍ TRATĚ**

TIME EVOLUTION OF VELOCITY DISTRIBUTION IN THE SPECIFIC AREA OF THE CALIBRATION  
CHANNEL

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

Ondřej Kosík

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

Ing. PAVEL ZUBÍK, Ph.D.

**BRNO 2020**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3647R015 Vodní hospodářství a vodní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav vodních staveb

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Ondřej Kosík
<b>Název</b>	Časový vývoj rozložení rychlosti v měrném prostoru kalibrační tratě
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Pavel Zubík, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	30. 11. 2019
<b>Datum odevzdání</b>	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

prof. Ing. Jan Šulc, CSc.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

Boor, B., Kunštátský, J., Patočka, C.: Hydraulika pro vodohospodářské stavby, 1. vydání, SNTL Praha, 1968

<https://www.dantecdynamics.com/laser-doppler-anemometry>

Firemní literatura Dantec k laserové dopplerovské anemometrii

Zásady bezpečnosti práce s Laserovou měřicí technikou

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Student provede pomocí LDA opakované dlouhodobé měření rozložení rychlostí v měrném prostoru speciální trati sloužící ke kalibraci vodoměrných vrtulí i dalších měřidel rychlosti proudění kapalin. Z naměřených dat vyhodnotí časovou stabilitu této trati a případný vývoj změn. Naměřené rychlosti budou využity jako vztažné hodnoty při zpracování diplomové práce Časový vývoj metrologických charakteristik elektromagnetických indukčních měřidel bodových rychlostí.

## STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

---

Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

Vedoucí bakalářské práce

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá ověřením použitelnosti a stanovením míry spolehlivosti kalibrační trati. Prostřednictvím LDA byly naměřeny střední hodnoty rychlosti pro jednotlivé referenční otáčky, které se pohybovaly v rozmezí  $0,0507\text{--}1,4036\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Se zvyšující se rychlostí stoupala i střední kvadratická odchylka, která dosáhla nejvyšší hodnoty  $0,0034\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Procentuální odchylka, která je pro dané měření vypovídající se naopak měnila nepřímo úměrně vůči středním hodnotám rychlosti a její hodnoty se pohybovaly v rozmezí  $0,242\text{--}0,473\%$ .

## KLÍČOVÁ SLOVA

měření rychlosti, kalibrace, LDA, střední hodnota rychlosti, střední kvadratická odchylka, procentuální odchylka

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the verification and determination of the degree of reliability of the calibration track. The mean speed values for individual reference speeds, which ranged from  $0,0507\text{--}1,4036\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , were measured by LDA. With increasing speed, the mean square deviation also increased, reaching the highest value of  $0,0034\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The percentage deviation, which is core value for the given measurement, on the other hand, changed inversely with respect to the mean values of the speed and its values ranged from  $0,242\text{--}0,473\%$ .

## KEYWORDS

velocity measurement, calibration, LDA, average velocity value, mean squared deviation, percentage deviation

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ondřej Kosík *Časový vývoj rozložení rychlosti v měrném prostoru kalibrační tratě*. Brno, 2020. 60 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav vodních staveb. Vedoucí práce Ing. Pavel Zubík, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Časový vývoj rozložení rychlosti v měrném prostoru kalibrační tratě* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 11. 5. 2020

---

Ondřej Kosík  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Časový vývoj rozložení rychlosti v měrném prostoru kalibrační tratě* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 5. 2020

---

Ondřej Kosík  
autor práce

## PODĚKOVÁNÍ

Touto cestou bych rád poděkoval především vedoucímu své bakalářské práce Ing. Pavlovi Zubíkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které mi v průběhu zpracování celé práce vždy s ochotou poskytnul. Rovněž bych rád poděkoval Bc. Martinovi Gajduškovi za kontrolu dokumentu a typografické rady při vypracování práce.

## OBSAH

1	Úvod.....	10
2	Teoretická část .....	11
2.1	Účel měření rychlosti.....	11
2.2	Metody měření rychlosti.....	11
2.3	Typy proudění.....	12
2.4	Zařízení pro měření rychlosti .....	13
2.4.1	Unášený plovák .....	13
2.4.2	Hydrometrická vrtule .....	13
2.4.3	Elektromagnetická indukční měřidla .....	15
2.4.4	Žárové anemometry.....	17
2.4.5	Laserový Dopplerovský anemometr .....	19
2.4.5.1	Požadavky na laser .....	19
2.4.5.2	Dopplerův jev .....	20
2.4.5.3	Princip funkce LDA.....	20
2.4.5.4	Použitelnost a shrnutí metody LDA .....	22
2.4.6	Rovinný laserový anemometr.....	23
2.4.7	Ultrazvukové anemometry .....	25
3	Experimentální část.....	28
3.1	Kalibrační trať .....	28
3.1.1	Typ proudění .....	29
3.2	Použitá LDA aparatura .....	29
3.2.1	Laser .....	30
3.2.2	Čočka.....	31
3.2.3	Optická sonda .....	31
3.2.4	Dělič barev .....	31
3.2.5	Fotonásobič .....	32
3.3	Software.....	32
3.4	Popis měřicí metody .....	33
3.5	Nastavení softwaru .....	33
3.6	Zvolená měrná síť .....	34
3.7	Postup měření .....	35
4	Výsledky a diskuse .....	37
4.1	Stanovení závislosti rychlosti na otáčkách jednotlivých měření .....	37



4.2	Stanovení celkové závislosti rychlosti na referenčních otáčkách.....	39
4.3	Stanovení závislosti rychlosti na čase .....	41
4.4	Stanovení středních hodnot a střední kvadratické odchylky .....	42
5	Závěr .....	44
6	Bibliografie .....	45
7	Přílohy.....	48

# 1 ÚVOD

Potřeba měření rychlosti je již od dob minulých podněcována zejména rozvojem průmyslu, vědeckým výzkumem a v podstatě i společností samotnou. Měření rychlosti se v praxi využívá od radarů v silniční dopravě, přes návrhové průtoky při revitalizacích a úpravách vodních toků, až po rychlosti a tvary jednotlivých proudnic vzduchu ve větrném tunelu. Nároky na kvalitu měřených dat jsou neustále zvyšovány, což zapříčiňuje rozvoj stávajících či vývoj nových, přesnějších, měřicích zařízení.

K dosažení co nejpresnějších měřených hodnot je rovněž nutné v pravidelných intervalech provádět kalibraci měřicích přístrojů, ať už se jedná o hydrometrickou vrtuli či jiná měřidla. Kalibrace se provádí zpravidla v akreditovaných kalibračních střediscích, nicméně každý uživatel pracovního měřidla je při dodržení metrologických posloupností oprávněn provádět kalibraci pro vlastní potřeby sám.

Pro účely úředního měření v profilech s volnou hladinou, kde je pravidelné kalibrování měřicích přístrojů dokonce zákonnou povinností, je v současné době jediným povoleným měřidlem dle metrologického předpisu MP 010 hydrometrická vrtule. Z tohoto důvodu na kalibrační trati v Laboratoři vodohospodářského výzkumu Fakulty stavební v Brně probíhá výzkum v rámci Referátu posuzování způsobilosti užití a legalizace alternativních měřidel bodové rychlosti. Výzkum je zaměřen na posouzení replikovatelnosti a rozptylu měřených rychlostí vykazovanými EMI měřidly, která dle Českého metrologického institutu spadají právě do kategorie alternativních měřidel. [1]

Tato bakalářská práce si proto klade za cíl ověřit použitelnost a stanovit míru spolehlivosti kalibrační trati pro výše uvedené účely. Ověření proběhlo na základě porovnání středních hodnot rychlostí naměřených v jednotlivých bodech během časového období jednoho roku a jejich středních kvadratických odchylek, z nichž se stanovil koeficient spolehlivosti.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Účel měření rychlosti

Rychlost je vektorové vyjádření posunu vykonané částicí za jednotku času. Základní jednotkou rychlosti je metr za sekundu [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ], nicméně poměrně často se setkáváme i s vyjádřením v kilometrech za hodinu [ $\text{km/h}$ ], jelikož pro většinu populace je tato jednotka snadněji představitelná. [2]

Podstatnou část měření rychlosti tvoří rovněž vyhodnocování získaných dat. Podle účelu měření, získaného množství dat a jejich kvality, lze použít různé interpretační metody. Z naměřené rychlosti ve známém profilu je možné stanovit průtok a z něj dále sestavit například limnigrafické křivky vodočetných profilů. Odlišnou metodu vyhodnocování představuje reverzní způsob, kdy naměřené rychlosti na laboratorním modelu můžeme použít k jeho verifikaci či změně návrhových parametrů zkoumaného objektu.

Měření rychlosti je však nutné provádět také pro účely kalibrace měřidel, která probíhá zpravidla v kalibračních střediscích akreditovaných Českým metrologickým institutem (zkráceně „ČMI“). V průběhu mezi akreditovanými kalibracemi, při které měřidlo obdrží kalibrační list, je však možné průběžně provádět, dodatečné kalibrace měřících aparatur.

### 2.2 Metody měření rychlosti

Proudění látek lze definovat jako směrově určený pohyb částic o konkrétní rychlosti proměnný v čase. Měření se primárně provádí v profilu, který je kolmý k ose proudění, nicméně je možné měřit i další složky rychlosti. Jednotlivé měřicí aparatury nejčastěji rozdělujeme na invazivní a neinvazivní. Většina přístrojů má z principu své funkce již předem dáno, zdali se jedná o invazivní či neinvazivní metodu. Některé měřicí metody, jako třeba ultrazvukové měření rychlosti (zkráceně „UIV“), však lze použít oběma způsoby.

Při použití invazivní neboli přímé metody měření přichází minimálně měřicí hlavice do přímého kontaktu s měřeným médiem. Do této kategorie se řadí například žárová anemometrie, víceotvorové tlakové sondy, EMI měřidla, hydrometrická vrtule apod. Použití přímé metody je vhodné zejména při proudění s volnou hladinou.

Neinvazivní neboli nepřímá metoda měření, kam spadají zejména laserové a ultrazvukové metody měření, naopak do kontaktu s měřeným médiem nepřichází. Nespornou výhodou užití nepřímé metody je například možnost měření průtoků přes stěnu potrubí, ale především neovlivnění měřeného děje.

## 2.3 Typy proudění

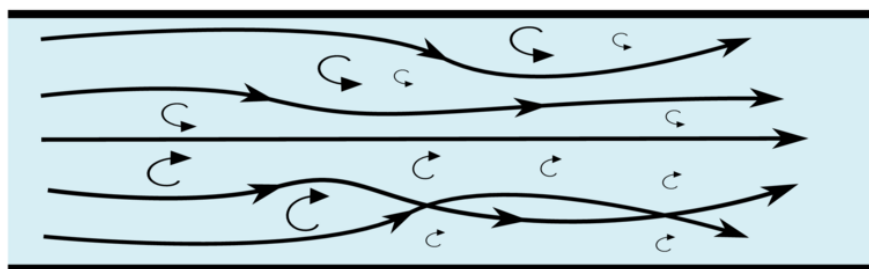
Určení konkrétního typu proudění sledovaného média patří k velmi důležitým úkonům, jelikož se poměrně významně podílí na přesnosti měření. Rozlišujeme zejména laminární a turbulentní proudění.

Při laminárním proudění předpokládáme, že nedochází ke změnám rychlosti jednotlivých vrstev, které jsou kolmé ke směru změny rychlosti. Při takovém typu proudění nedochází ke vzájemnému mísení tekutin mezi vrstvami. U Turbulentního proudění naopak k mísení jednotlivých vrstev tekutin dochází. Tento jev zapříčiňují vyšší hodnoty smykového napětí působícího mezi vrstvami. Rychlost jednotlivých vrstev je v čase neustálá, čímž vznikají víry, které neumožňují spojitě rozložení tekutiny. [3]

Laminární proudění



Turbulentní proudění



Obrázek č. 1: Vizualizace laminárního a turbulentního proudění [4]

Určujícím parametrem pro stanovení „hranice“ mezi laminárním a turbulentním prouděním je hodnota Reynoldsova kritéria (v angličtině „*Reynolds number*“). Jedná se o bezrozměrnou veličinu užívanou v mechanice tekutin k předpovídání tokových vzorců. Pojem hranice může být mírně zavádějící, jelikož neexistuje striktní předěl mezi jednotlivými typy proudění. Vhodnější je tedy uvažovat o přechodovém pásmu, ve kterém dojde ke změně převládajícího typu proudění na základě širokého spektra proměnných.

Pokud si pro názornost představíme proudění v potrubí, stanoví se hodnota Reynoldsova kritéria ze vztahu:

$$Re = (v \cdot D)/\nu \quad [-] \quad (1)$$

kde „ $v$ “ je rychlost, „ $D$ “ průměr potrubí a „ $\nu$ “ kinematická viskozita. Za těchto podmínek lze spodní hranici pásma, pod kterou se nachází laminární proudění, vymezit hodnotou Reynoldsova kritéria přibližně 2320. Horní hranici přechodu na turbulentní proudění je možné posunout až k hodnotě 13 800, pokud budeme rychlost proudění zvyšovat pozvolně. [3]

## **2.4 Zařízení pro měření rychlosti**

V současné době existuje bezpočet měřicích zařízení sloužících ke stanovení momentální rychlosti. Určujícími faktory pro volbu aparatury jsou především prostředí, ve kterém měření probíhá, řádové rychlosti, typ proudění a požadavky na kvalitu měření, od čehož se odvíjí i cena aparatury.

### **2.4.1 Unášený plovák**

Plováková metoda je nejlevnější ale rovněž nejméně přesnou možností stanovení rychlosti proudění. Slouží spíše k průzkumu a stanovení řádových rychlostí v měrném profilu pro další měření, protože vykazuje značně nekonzistentní výsledky. Přesnost měření se navíc se zvyšující rychlostí proudění snižuje.

Princip měření je velmi jednoduchý. V prvé řadě je třeba vyhledat co nejdelší rovný úsek řeky o známé délce s konstantním prouděním. Poté se plovák, který je mimo stopky a pásmo jediným potřebným vybavením, umístí na střed toku. Jakmile plovák urazí celou vzdálenost, stačí už pouze vydělit příslušnou délku naměřeným časem.

### **2.4.2 Hydrometrická vrtule**

Jedná se o invazivní měřicí metodu, kdy dochází k přímému kontaktu snímacího zařízení s měřeným médiem. I přes značný rozvoj měřicích zařízení, stále zůstává měření pomocí vodoměrné vrtule různých konstrukcí nejčastější metodou měření bodové rychlosti vodního proudu. V oblasti autorizovaného úředního měření průtoků s volnou hladinou se dle metrologického předpisu MP 010 jedná dokonce o jediné povolené měřidlo.

Nejrozšířenější konstrukční variantou v Evropě je vrtule s horizontální osou rotace, jejíž konstrukce je odvozena od původní Woltmannovy vrtule z roku 1790. U původní konstrukce byla použita lopatková kola, která však v současnosti byla nahrazena přesnějším šroubovicovým propelerem. V zámoří se používají převážně miskové vrtule se svislou osou rotace, které jsou principiálně podobné anemometrům. Vrtule se dodávají zpravidla s výměnnými propelery o různých průměrech a stoupáních šroubovice, aby bylo možné jejich vhodnou volbou dle podmínek měření postihnout širší spektrum měřených rychlostí. [1] [5]



Obrázek č. 2: Hydrometrická vrtule typu OTT C2 [6]

Princip funkce vodoměrné vrtule je založen na snímání počtu vykonaných otáček. Přenos informací u starších typů vrtulí probíhal prostřednictvím akustického signálu, který zazněl po předem stanoveném počtu vykonaných otáček (zpravidla deset, dvacet nebo padesát). V současné době se přenos uskutečňuje nejčastěji mechanicky, magneticky nebo opticky. Běžně dostupné moderní vrtule obvykle vysílají impuls po každé vykonané otáčce, nicméně z laboratorních mikro-vrtulí o průměrech menších než 25 mm odchází signál i více než šedesátkrát za otáčku. Vrtule musí být v měrném profilu na tyči umístěna tak, aby její osa a směr proudnic kapaliny byly, pokud možno, rovnoběžné. Žádoucí parametry a informace o kalibraci měřicích zařízení jsou uvedeny v normách ČSN ISO 2537 a ČSN ISO 3455. [5] [7] [8]

Při zpracování dat se nejprve zaznamená počet otáček  $N$  [-] za zvolený časový interval  $T$  [s] dle rovnice č. 2. Výsledná bodová rychlost se stanoví z kalibrační rovnice vrtule dle rovnice č. 3 za pomoci platných kalibračních konstant  $\alpha_i$  a  $\beta_i$  pro uvedený rozsah otáček. [5]

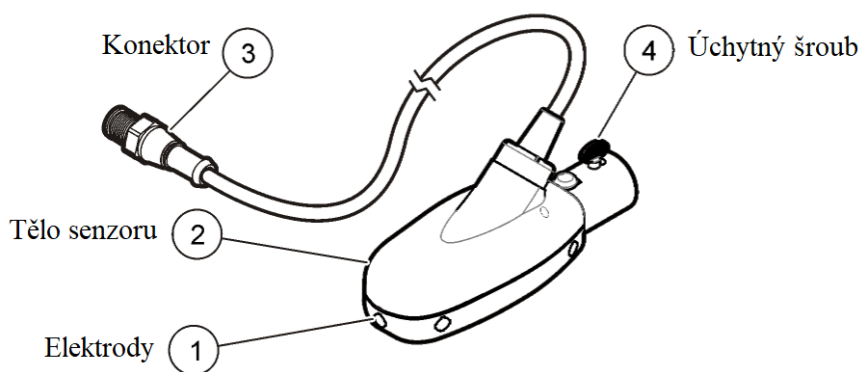
$$n = N/T \text{ [s}^{-1}\text{]} \quad (2)$$

$$v_i = \alpha_i + \beta_i \cdot n \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]} \quad (3)$$

Hydrometrování je v současné době nejlevnější variantou přesného stanovení běžných průtoků. Měření za pomoci vodoměrné vrtule však není vhodné pro spektrum rychlostí limitně se blížících nule, jelikož v této oblasti dochází v důsledku nízkého počtu naměřených dat ke značným odchylkám jednotlivých hodnot, což má za následek nižší hodnotu koeficientu spolehlivosti. S ohledem na zachování přesnosti měření je nutné poměrně často provádět kalibraci, neboť plaveniny, které přijdou do kontaktu s propelerem jej po určité době částečně poškodí. Vrtulový set proto musí mít konstrukci dostatečně odolnou, což zvyšuje i jeho hmotnost. [8]

### 2.4.3 Elektromagnetická indukční měřidla

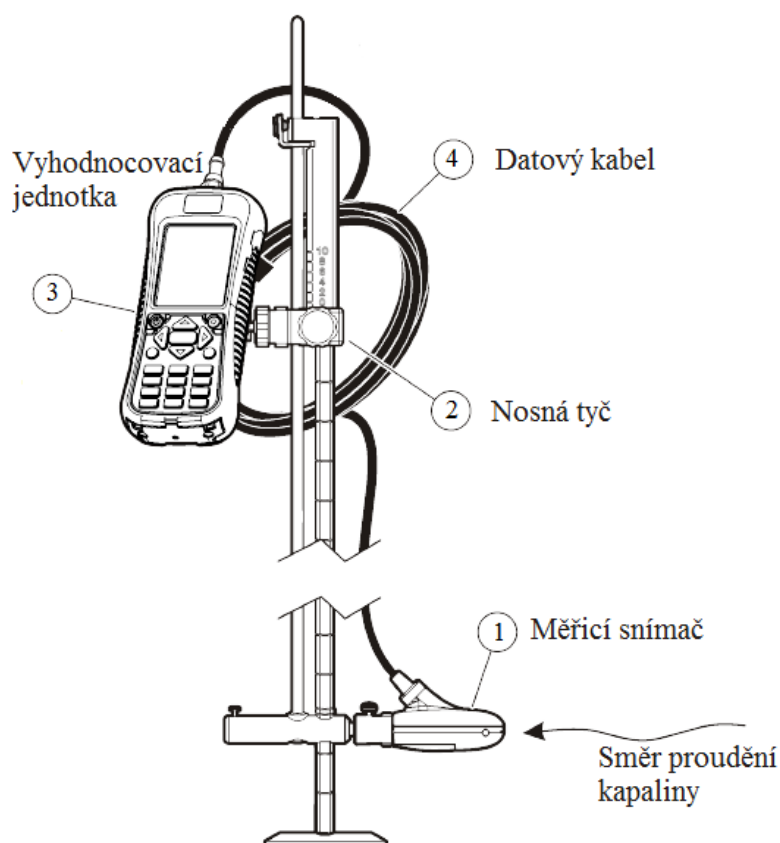
Elektromagnetická indukční měřidla (dále jen EMI měřidla) bodové rychlosti spadají do kategorie invazivních metod měření. Z koncepčního hlediska je uspořádání prvků měřicí soustavy obdobné jako u hydrometrické vrtule, nicméně současné metrologické předpisy diskriminují a v některých případech dokonce vylučují použití jiných měřicích nástrojů, než je hydrometrická vrtule. Z hlediska normativních podkladů a technických standardů lze však v normě ČSN EN ISO 748, která je primárně určena pro vodoměrné vrtule, nalézt i zmínku o možnosti použití právě EMI měřidel. Metody a podmínky kalibrace jsou stejně jako pro vodoměrné vrtule stanoveny již zmiňovanou normou ČSN ISO 3455. [1] [7] [9]



Obrázek č. 3: Popis měřícího snímače [10]

Princip funkce EMI měřidel spočívá ve využití elektromagnetické indukce, při které dochází ke vzniku elektrického napětí na koncích vodiče pohybujícího se v magnetickém poli. Mezi tímto napětím a rychlostí pohybu vodiče platí přímá úměrnost. Měřicí snímač, znázorněný na obrázku č. 3, sestává z cívky elektromagnetu a dvojice uhlíkových elektrod.

Kompletní měřicí aparatura se zpravidla skládá z nosné tyče, vyhodnocovací jednotky, datového kabelu a snímače. S ohledem na skutečnost, že měřicí sestava znázorněná na obrázku č. 4 se vždy kalibruje jako celek, je nahrazování jednotlivých komponent bez opětovné kalibrace nepřípustné. [1]



Obrázek č. 4: Běžná sestava EMI měřidla [1]

EMI měřidla díky své konstrukci umožňují sběr dat i v oblastech, kde by užití hydrometrických vrtulí bylo velmi problematické nebo zcela vyloučené. Jedná se zejména o místa ležící blíže okrajům měrných profilů nebo silně znečištěná prostředí, ať už mluvíme o odpadní vodě či korytech s hustou vegetací. V těchto podmínkách dosahují EMI měřidla oproti hydrometrické vrtuli mnohem přesnějších výsledků, jelikož nedochází k ulpívání nežádoucích částic na propeleru. Další výhodou je schopnost zachycování rychlostního spektra pod  $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , což je víceméně hodnota prahu citlivosti běžných vodoměrných vrtulí. [1]



#### 2.4.4 Žárové anemometry

Žárová anemometrie je měřicí metoda s velmi krátkou odezvou vhodná zejména k měření rapidně proměnlivých jevů jako je turbulentní proudění. Fyzická konfigurace měřicího senzoru sestává ze dvou hrotů a velmi tenkého drátku umístěného mezi nimi, který je elektricky zahříván. Celé měření funguje na principu odvádění tepla „q“, jenž je generováno procházejícím proudem a lze jej vyjádřit pomocí Joulova tepla jako: [2]

$$q = R_w \cdot I^2 \cdot t [m^2 \cdot kg \cdot s^{-2}] \quad (4)$$

kde „ $R_w$ “ značí elektrický odpor, „ $I$ “ elektrický proud a „ $t$ “ dobu, po kterou proud vodičem prochází. Elektrický odpor je závislý na teplotě drátku. [11]

S konstantním elektrickým odporem jsou hodnoty proudu protékajícího drátkem nuceny kolísat vzhledem ke změnám rychlosti ochlazování drátku, kterou způsobuje fluktuace proudícího média. Jinými slovy tedy dochází ke změnám teploty drátku, pokud není prováděna kompenzace regulací procházejícího proudu. Z výše uvedeného je zřejmé, že k měření takto rychle se měnícího signálu musí mít celá aparatura velmi rychlé odezvy, aby bylo vůbec možné drobné nuance ve změnách teplot regulovat. [11]

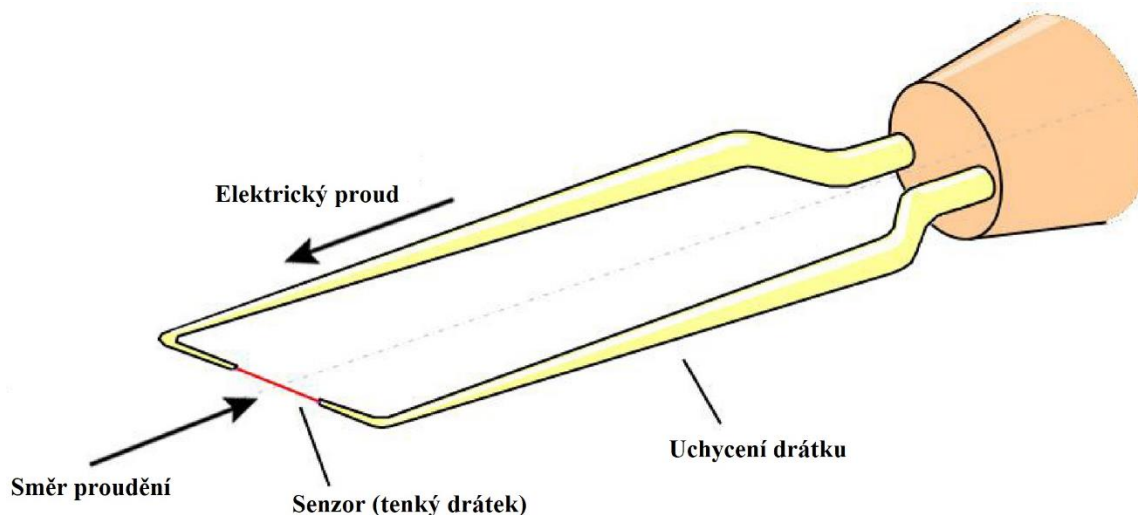
Žárové sondy jsou hojně využívány ve vědeckých studiích zabývajících se monitorováním proudění v mezních vrstvách větrných tunelů. Jedná se o jeden z nejstarších předmětů výzkumu mechaniky tekutin a plynů, jelikož je relevantní pro technologické aplikace, jako je aerodynamický design, námořní inženýrství, výroba energie atd.

U měřicích senzorů existují jednodrátkové či vícedrátkové varianty, jejichž volba závisí na zamýšleném výstupu měření. Na základě sledovaných veličin rovněž rozlišujeme dvě výchozí techniky měření. [12]



Obrázek č. 5: Senzory žárových sond s odlišným počtem drátků a tvarem vidlic [13]

První z nich je metoda CCA (z angličtiny „*Constant Current Anemometry*“), při níž drátkem protéká konstantní množství proudu. Teplota drátku je proměnlivá vlivem proudění měřených látek, což vyvolává nepatrné, avšak měřitelné, změny odporu, ze kterých lze stanovit rychlost pohybu částic. [14]



Obrázek č. 6: Detail jednodrátkové žárové sondy [15]

Druhou technikou měření je CTA (z angličtiny „*Constant Temperature Anemometry*“), která spočívá v udržování konstantní teploty. Aby to však bylo možné, musí docházet k regulacím proudu procházejícího drátkem. Na základě velikosti a četnosti těchto změn jsme pak schopni určit rychlost proudění měřených částic. [11]

Jednou z největších nevýhod žárové anemometrie je použitelnost pouze v čistých plynech, tedy víceméně v laboratorních podmínkách, jelikož průměr drátku se pohybuje okolo 5  $\mu\text{m}$ . Nečistoty unášené v prostoru mohou snadno a velmi značně ovlivnit měření připečením na rozžhavený drát, nebo sondu jiným způsobem poškodit. Před každým měřením, nebo i v průběhu dlouhodobějšího měření je nutné provádět kalibraci. [16]

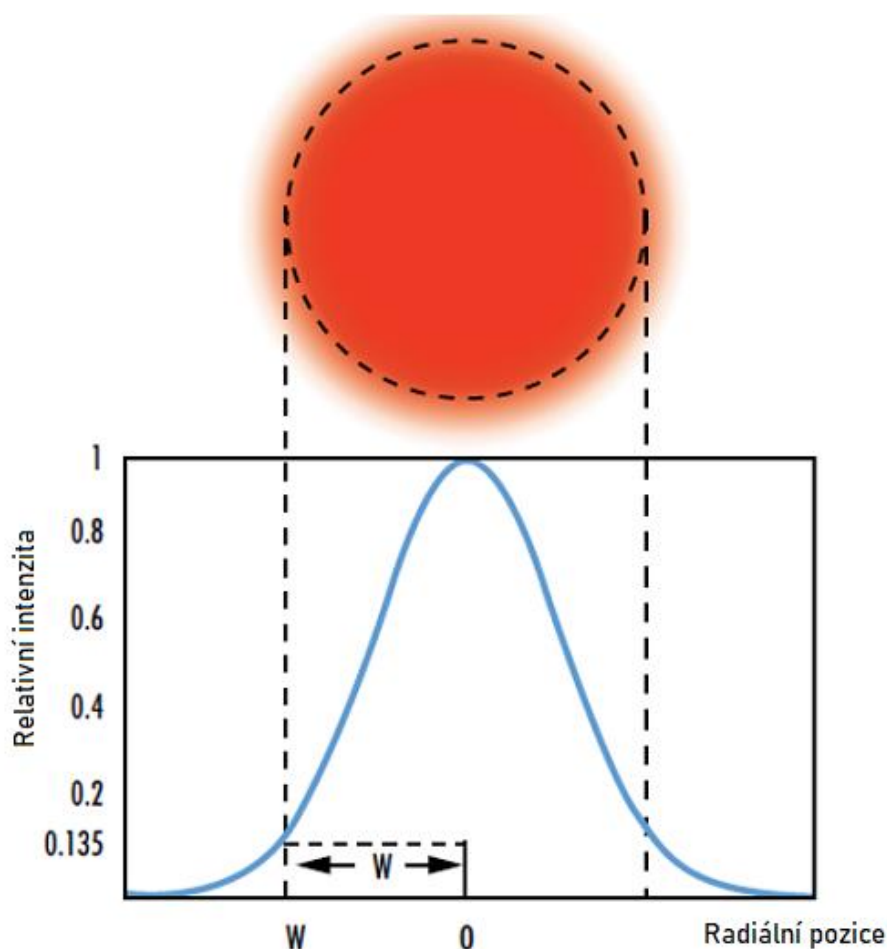
V menší míře se žárové sondy používají i pro měření v kapalinách, kde je však tenký drátek nahrazen žhavenými elementy. Tyto elementy však mají mnohem pomalejší odezvu, a tudíž nejsou vhodné do prostředí, kde dochází k rychlým změnám rychlosti proudění.

## 2.4.5 Laserový Dopplerovský anemometr

Laserová Dopplerovská anemometrie, případně bodová laserová anemometrie, (z angličtiny „*Laser Doppler anemometry*“, zkráceně „*LDA*“) je neinvazivní měřicí metoda, která vděčí za svůj vznik vynálezu laseru, na kterém je zcela závislá. Laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) funguje na principu zesilování světelných vln pomocí stimulované emise záření.

### 2.4.5.1 Požadavky na laser

Lasery využitelné pro potřeby LDA musí nepřerušovaně emitovat koherentní (tedy monochromatické, lineárně polarizované) světlo v příčném módu  $TEM_{00}$ . Příčný mód v podstatě popisuje profil svazku laserového paprsku, který musí mít stejný tvar jako Gaussův paprsek. [17] [18]



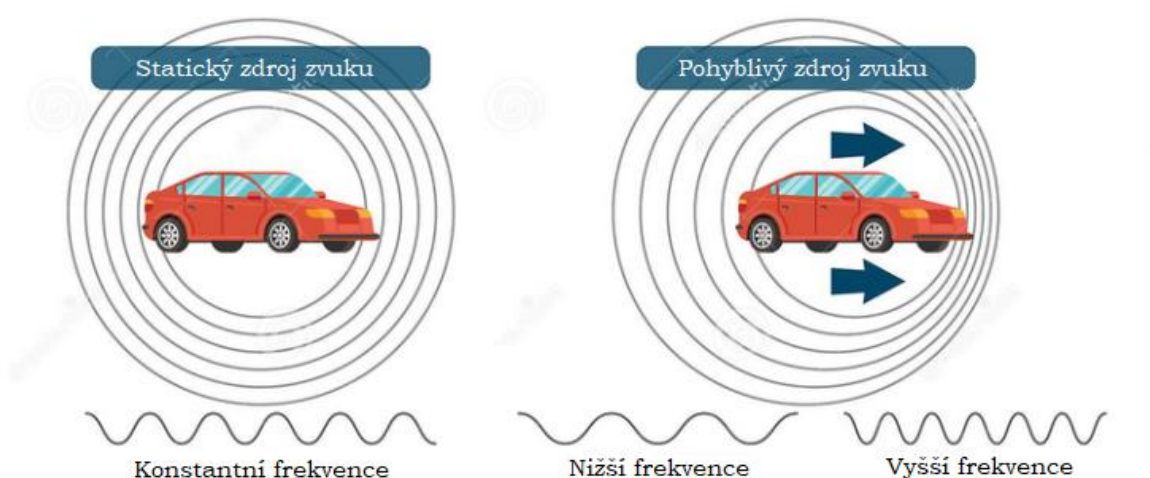
Obrázek č. 7: Profil laserového paprsku v příčném módu  $TEM_{00}$  [19]

Díky rozvoji plynových laserů došlo k umožnění optického bezkontaktního měření rychlosti plynů, tekutin i pevných látek založeného na principu Dopplerova jevu.

### 2.4.5.2 Dopplerův jev

Dopplerův jev (z angličtiny „*Doppler effect*“), který byl poprvé popsán rakouským vědcem Christianem Dopplerem v roce 1842, je založen na změně frekvence mezi vyslaným a přijatým signálem vlivem pohybu vysílacího zdroje. [2]

Optikou LDA by se na Dopplerův jev dalo nahlížet následně. Laserový svazek z vysílače o rychlosti „ $c$ “ a frekvenci „ $f_v$ “ dopadá na měřenou částici, čímž dojde k rozptylu světla a částice se tak stává pohyblivým zdrojem světla. Díky svému pohybu však částice do přijímače odráží frekvenci „ $f_s$ “. Rozdíl mezi původní a změněnou frekvencí lze označit jako dopplerovskou změnu frekvence, jejíž velikost je závislá na směru a rychlosti pohybu částice. [17] [20]



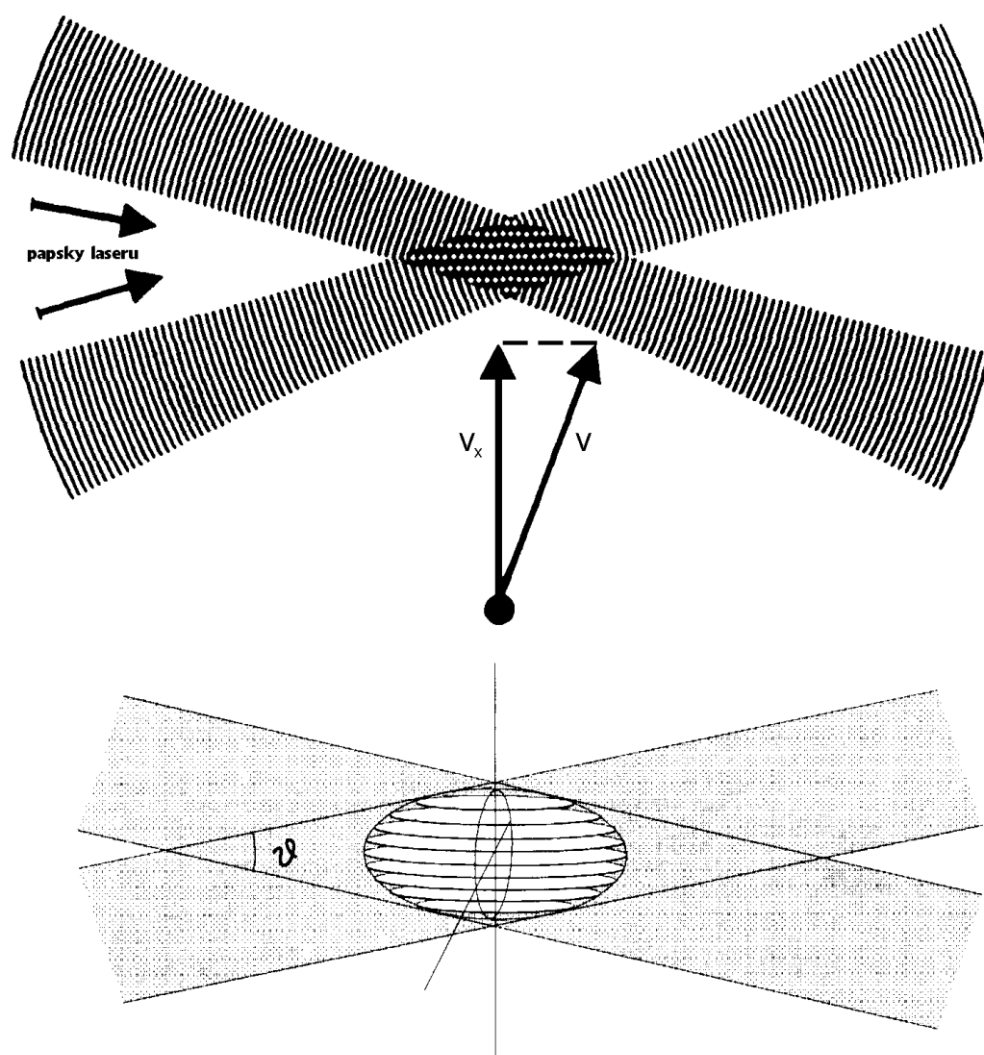
Obrázek č. 8: Grafické znázornění Dopplerova jevu [21]

Lze tedy konstatovat, že pokud se vysílač a přijímač budou vzájemně přibližovat, frekvence se bude zvyšovat a pokud se budou oddalovat, bude se frekvence snižovat. Tento princip funguje při šíření světla i zvuku. Pro lepší znázornění si lze představit například projíždějící sanitku, jejíž houkání má vysokou frekvenci, dokud se přibližuje. Jakmile se však začne vzdalovat, její frekvence se znatelně sníží.

### 2.4.5.3 Princip funkce LDA

Základní princip fungování leží ve využití výše popsaného Dopplerova jevu. Z laseru vychází jeden paprsek, který je polopropustným zrcadlem rozdělen na dva. Jeden z nich projde přes Braggovu celu, čímž dojde k posunu jeho frekvence o známou hodnotu. Pomocí spojné čočky dojde k lomu paprsků, které v ohnisku interferují a svým průnikem vytváří optickou sondu.

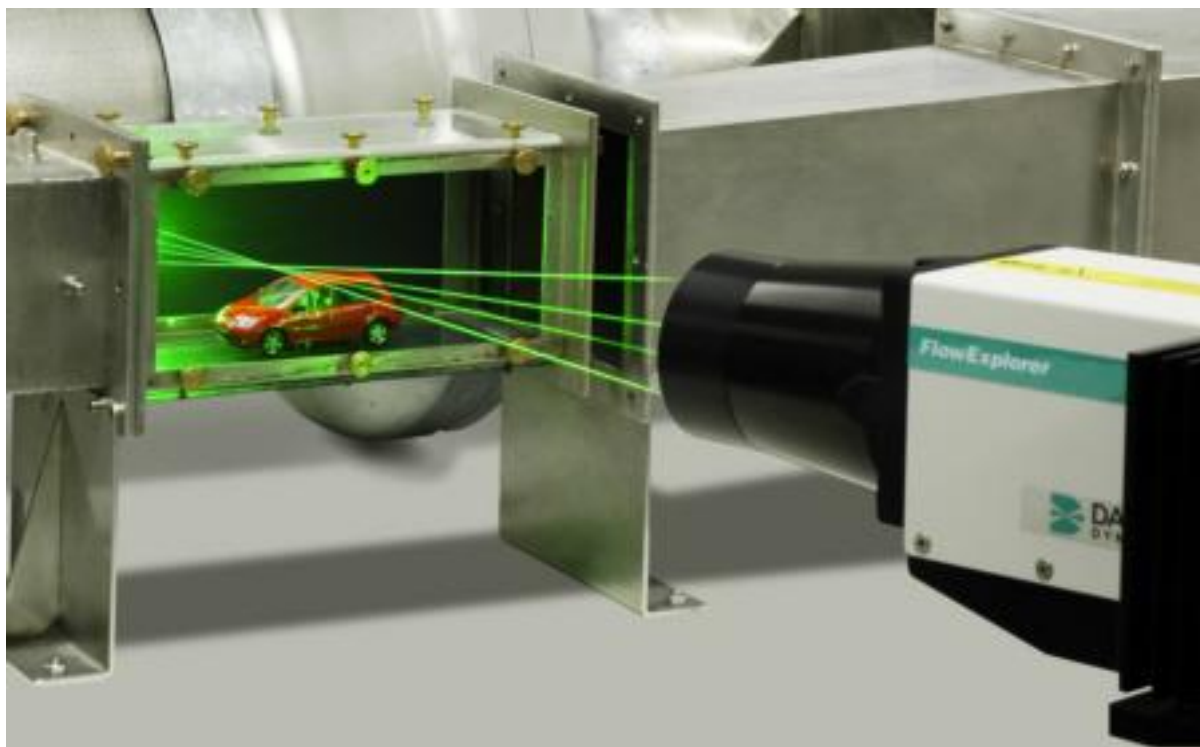
Přesněji lze princip LDA velmi efektivně popsat skrze interferenční model. V horní části obrázku č. 9 lze pozorovat schematické zobrazení sčítání a odečítání rovinných vln dvou interferujících koherentních laserových svazků. Jelikož je tento rastr přičiněním neměnné vlnové délky laserového světla stabilní, lze LDA považovat za absolutní měřidlo, což v praxi znamená, že není nutné provádět pravidelnou kalibraci měřicí aparatury. Vzhledem ke skutečnosti, že laserové svazky mají kruhový průřez a v pásmu  $TEM_{00}$  Gaussův průběh intenzity, má prostor, ve kterém dochází k interferenci, tvar rotačního elipsoidu, jenž je patrný z dolní části obrázku č. 9. Tento prostor můžeme nazvat optickou sondou. [17]



Obrázek č. 9: Interferenční model a tvar optické sondy LDA [17]

V případě, že vhodná částice projde optickou sondou, dojde k odeslání signálu, jenž je úměrný složce její rychlosti v rovině kolmé na osu optické aparatury. Tento signál putuje do přijímače, odkud je dále přeměrován do jednoúčelového počítače, který pomocí autokorelace analyzuje Dopplerův zákmít. [17]

Měření pomocí metody LDA lze rozdělit dle zvolené diferenční metody na dopřednou a zpětnou. Volba závisí na tom, která část světla odraženého částicí je snímána fotodetektorem. Z praktického hlediska je především nutné brát v potaz skutečnost, že při použití dopředného rozptylu musí být umožněn optický vstup nejen ze strany příchozích laserových svazků, ale i z protější strany pro zachycení signálu. Při použití zpětné metody je nezbytný pouze jeden optický vstup, nicméně intenzita odraženého světla je řádově nižší. [17]



Obrázek č. 10: Měřicí aparatura LDA při měření 2D [22]

#### 2.4.5.4 Použitelnost a shrnutí metody LDA

Mezi nesporná pozitiva měření pomocí LDA patří zejména absence nutnosti kontaktně zasahovat do měřeného média. Další výhodou je možnost měření složek rychlosti podle potřeby ve formátu 1D, 2D nebo 3D. Metoda LDA je navíc díky frekvenčnímu posunu pomocí Braggovy cely schopna skutečně měřit i absolutně nulové rychlosti, a ne na ně jen usuzovat ze skutečnosti, že měřicí přístroj „nic neměří“.

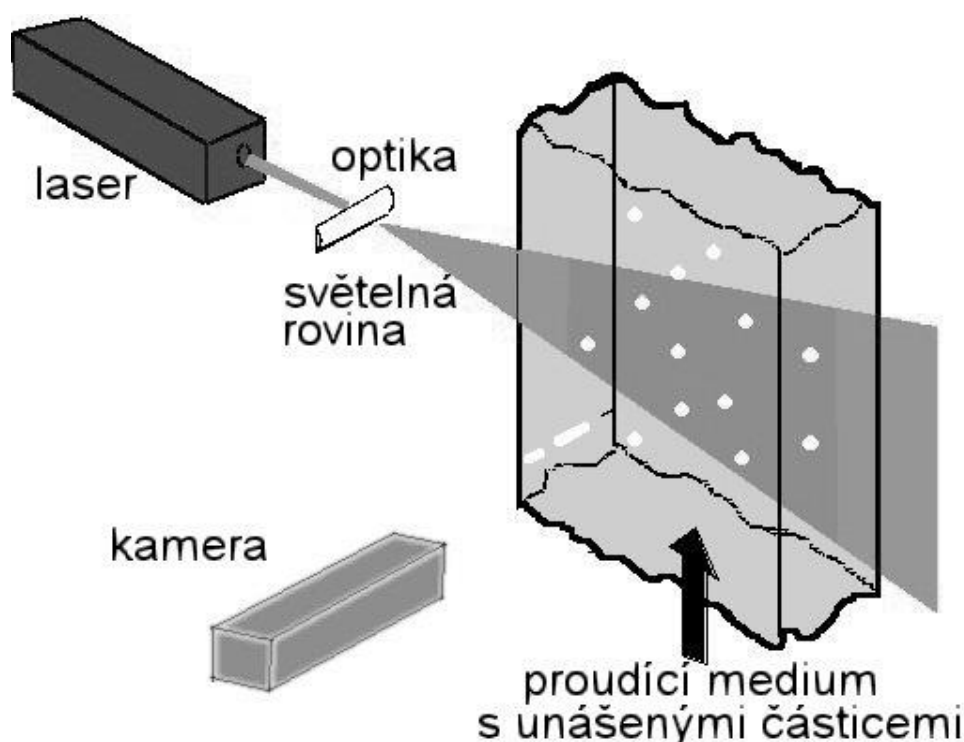
Aby však bylo možné vůbec měření provádět, je nutné, aby se v měřeném médiu vyskytovaly mikroskopické částičky schopné odrážet laserový paprsek. LDA tudíž nelze použít v naprosto čistých látkách. Měření proudění vzduchu je tím pádem bez přidavku jiných látek, jako je například kouř, nemožné. [16]

Ve srovnání s metodou PIV, která bude popsána níže, trvá měření pomocí LDA asi 25x déle, než za využití mladší technologie PIV. Je tomu tak zejména proto, že LDA měří bodovou rychlost pouze v několik milimetrů velké optické sondě, kdežto metoda PIV naproti tomu souvisle monitoruje celou dvojrozměrnou oblast. [16]

#### 2.4.6 Rovinný laserový anemometr

Rovinná laserová anemometrie, případně měření rychlosti pomocí obrazů unášených částic, (z angličtiny „*Particle image velocimetry*“, zkráceně „*PIV*“) spadá do kategorie neinvazivních metod měření rychlosti proudění. Jedná se o metodu umožňující získání informací o momentálním rozložení rychlostního pole proudícího média ve dvourozměrné dimenzi. [23]

Určení rychlosti probíhá standardně ze vzdálenosti, kterou částice urazí za jednotku času. Tyto částice mohou být součástí měřeného média, nicméně zpravidla jsou přidávány dodatečně, podobně jako u LDA. Následně se všechny částice, které projdou rovinným světelným řezem analyzují. [24]

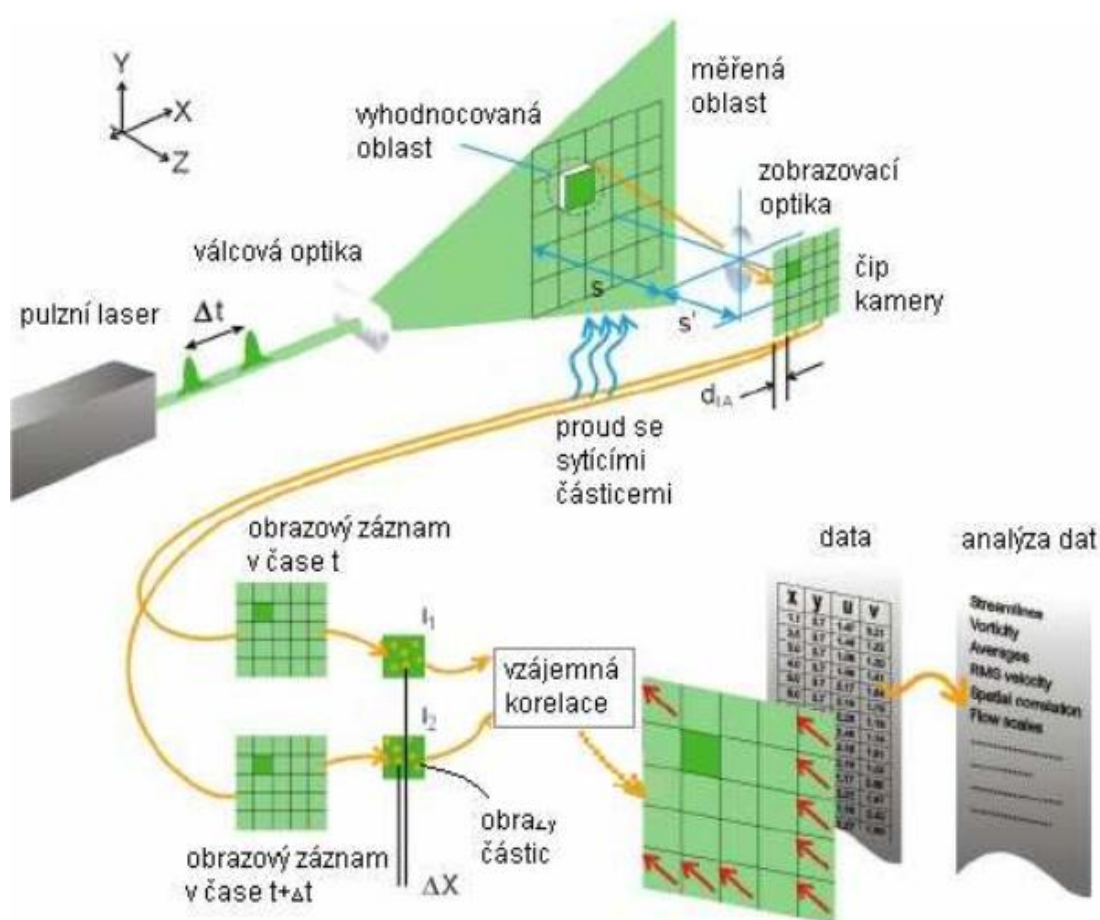


Obrázek č. 11: Schematické uspořádání měřicí aparatury PIV [24]



Tato světelná rovina je vytvořena za pomoci válcové optiky z laserového svazku, který pochází z pulzního laseru. Pulzní lasery jsou využívány zejména proto, aby byl umožněn vznik stroboskopického jevu, díky kterému dochází k optickému zastavení pohybu měřených částic procházejících světelnou rovinou. Doba, mezi jednotlivými pulzy slouží k výpočtu rychlosti proudění. [25]

Uspořádání jednotlivých prvků měřicí aparatury je obvykle voleno tak, že záznamový systém, kterým je nejčastěji speciální kamera, je umístěn kolmo k optické ose laseru. Sběr dat probíhá tak, že kamera ve velmi krátkém časovém sledu pořídí dva snímky, na nichž jsou částice zachyceny jako „světlá zrna“ na tmavém pozadí. [24]



Obrázek č. 12: Princip funkce a způsob vyhodnocování dat metodou PIV [26]

Celé pole je pak rozděleno pomyslnou mřížkou na dílčí plochy, kde se pro každou z nich stanoví vektor, který symbolizuje průměrný posun všech částic plochy tak, jak je znázorněno na obrázku č. 12. Velikost průměrného posunu se již pouze vydělí uplynulým časem mezi jednotlivými pulzy, čímž získáme tzv. mapu nezpracovaných vektorů, ze které se pomocí kontrolních softwarových algoritmů odstraní chybné naměřené hodnoty. Z těchto dat je již možné vytvářet finální výstupy v podobě tvaru jednotlivých proudnic atp. [23] [25]



Nesporná výhoda PIV, jako i ostatních laserových měřidel, spočívá zejména v neinvazivním způsobu měření. Navíc však dokáže měřit rychlosti od nulových hodnot až po rychlost zvuku a oproti LDA v rámci jediného měření dokáže zaznamenat rychlosti v celém poli, ze kterého probíhá zisk dat, tudíž je mnohem rychlejší. Při speciálním uspořádání kamer je dokonce možné měřit všechny tři složky rychlosti.

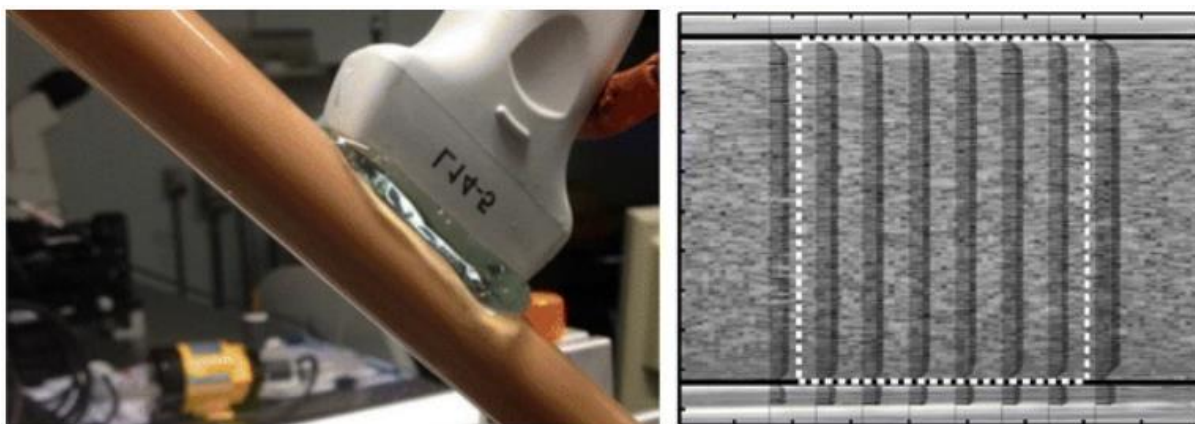
Hlavními nevýhodami této metody jsou především špatná finanční dostupnost pro běžné uživatele a nutnost zdlouhavě a komplikovaně provádět kalibraci před každým měřením. Rovněž je žádoucí dobrá optická přístupnost v části, kde probíhá měření, což je oproti LDA, kterému stačí poměrně malý přístup na jedné straně velká nevýhoda.

#### 2.4.7 Ultrazvukové anemometry

Ultrazvuková anemometrie obecně patří do kategorie neinvazivních, jinými slovy bezkontaktních, měřicích metod. Oproti ostatním neinvazivním metodám umožňuje provádět měření i v oblastech bez optického či fyzického přístupu. Tato technologie se již delší dobu principiálně využívá v medicínských aplikacích, ale v technické praxi se ve větší míře začala prosazovat až v posledních dvou desetiletích. [27] [28]

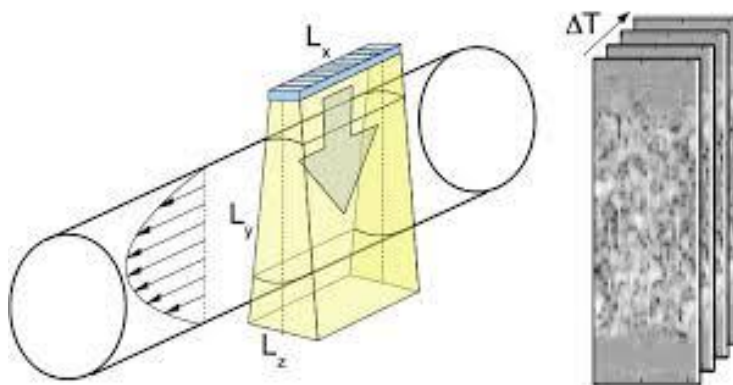
Princip funkce spočívá ve vysílání ultrazvukových vln, jejichž frekvence se pro technické účely pohybuje řádově v jednotkách až desítkách MHz. Vyslané vlny, které mohou být příčné nebo podélné podle užití měřicí aparatury, se odráží od látek rozptýlených v měřeném médiu a následně jsou zachycovány druhým, nebo původním transmitterem. Výstupní formát dat se liší dle zvolené ultrazvukové metody měření. [28]

Jedna z ultrazvukových měřicích metod je rovinná ultrazvuková anemometrie (z angličtiny „*Ultrasound imaging velocimetry*“, zkráceně „*UIV*“), která snímá rychlostní pole kolmo k ose potrubí. Výstupní data jsou proto namodelována jako 2D snímky. [27]



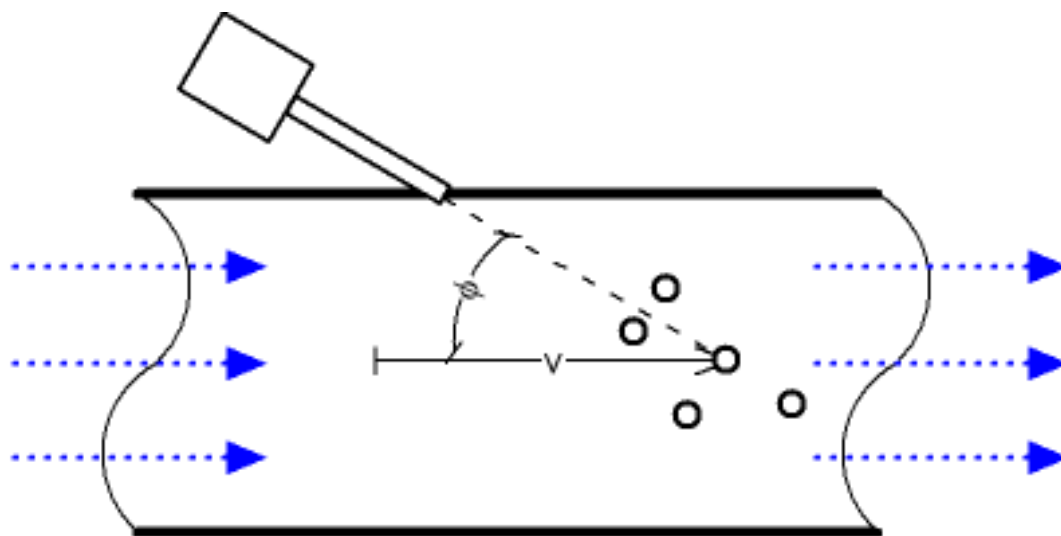
Obrázek č. 13: Měřicí aparatura UIV s gelem na potrubí a výsledné vektorové pole [28]

Pokud provádíme měření ve vodě, je nutné přidat částice s dobrými akustickými vlastnostmi. Tyto částice si lze představit jako dobře dispergovaný materiál ve vodním prostředí s velkými rozdíly impedance vzhledem k měřené kapalině. Těmito částicemi nemusí být nutně pevné látky, ale lze využít například i fluorid sírový ( $\text{SF}_6$ ), který má zhruba 6x vyšší hustotu než vzduch. [27] [28]



Obrázek č. 14: Schematické zobrazení měřicí metody UIV [27]

Další možností měření je využití UVP monitoru (z angličtiny „*Ultrasonic velocity profiling*“, zkráceně „*UVP*“), který je schopen měřit okamžité rychlosti pole nebo vytvářet průměrované hodnoty. Tato metoda, kterou lze použít kontaktně i bezkontaktně funguje na principu Dopplerova jevu, stejně jako LDA. Jediným rozdílem je fakt, že k přenosu informace jsou využívány ultrazvukové vlny namísto laserového světla. [29]



Obrázek č. 15: Schematické znázornění měření proudění v potrubí pomocí UVP [30]

Při použití UVP je nutné ultrazvukové vlny vyslat pod úhlem, jak je znázorněno na obrázku č. 15. V měrném profilu dojde k vytvoření virtuální sítě bodů, kde jsou zaznamenávány rychlosti rovnoběžné s osou transponderu. Ke stanovení složky rychlosti rovnoběžné s osou potrubí je nutné použít přepočít o známý úhel odklonu  $\Phi$ . [29] [31]



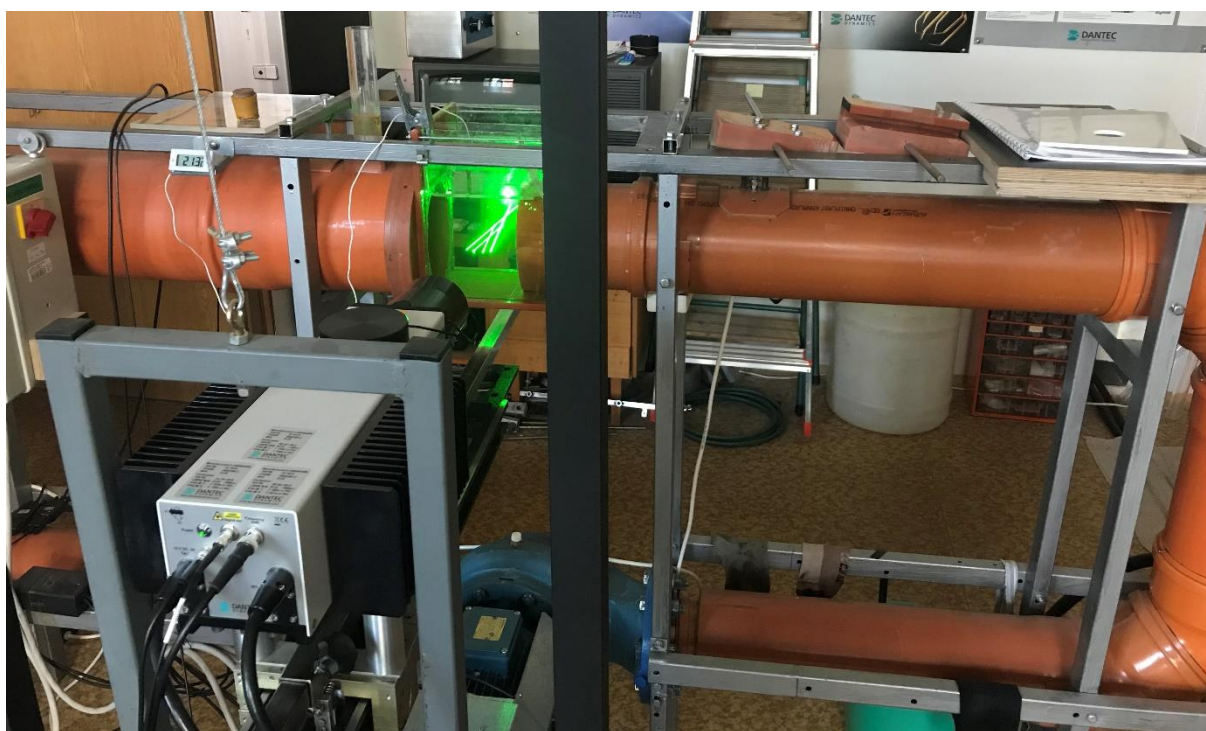
*Obrázek č. 16: kontaktní UVP sonda [32]*

Největší výhodou ultrazvukových měřicích metod oproti ostatním konkurenčním metodám je skutečnost, že k provedení bezkontaktního měření není potřeba absolutně žádný optický přístup, což nám umožňuje měřit zvenčí rychlosti i v uzavřeném potrubí. Další nespornou výhodou je možnost měřit poměrně vysoké rychlosti proudění bez ztráty prostorové či časové přesnosti. Značnou komplikací naopak zůstává správné nastavení míry zkreslení, kterou způsobuje především viskozita a teplota měřené kapaliny. V případě, kdy měříme rychlost bezkontaktně v potrubí, je nutné uvažovat i stěnu potrubí v závislosti na druhu použitého materiálu, její tloušťce a stáří. [31]

## 3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

### 3.1 Kalibrační trať

Kalibrační trať slouží k výzkumu jednotlivých parametrů proudění kapalin a současně kalibraci a verifikaci přesnosti EMI měřidel, hydrometrických vrtulí a jiných měřidel bodové rychlosti. Kalibrační okruh se skládá z plastového potrubí o průměru 150 mm, čerpadla s vlastním chlazením a proskleného kalibračního prostoru. Další příslušenství trati tvoří chladicí okruh s generátorem, otáčkoměr čerpadla, teploměr, 3D traverzační systém pro laserovou aparaturu a výpočetní technika.

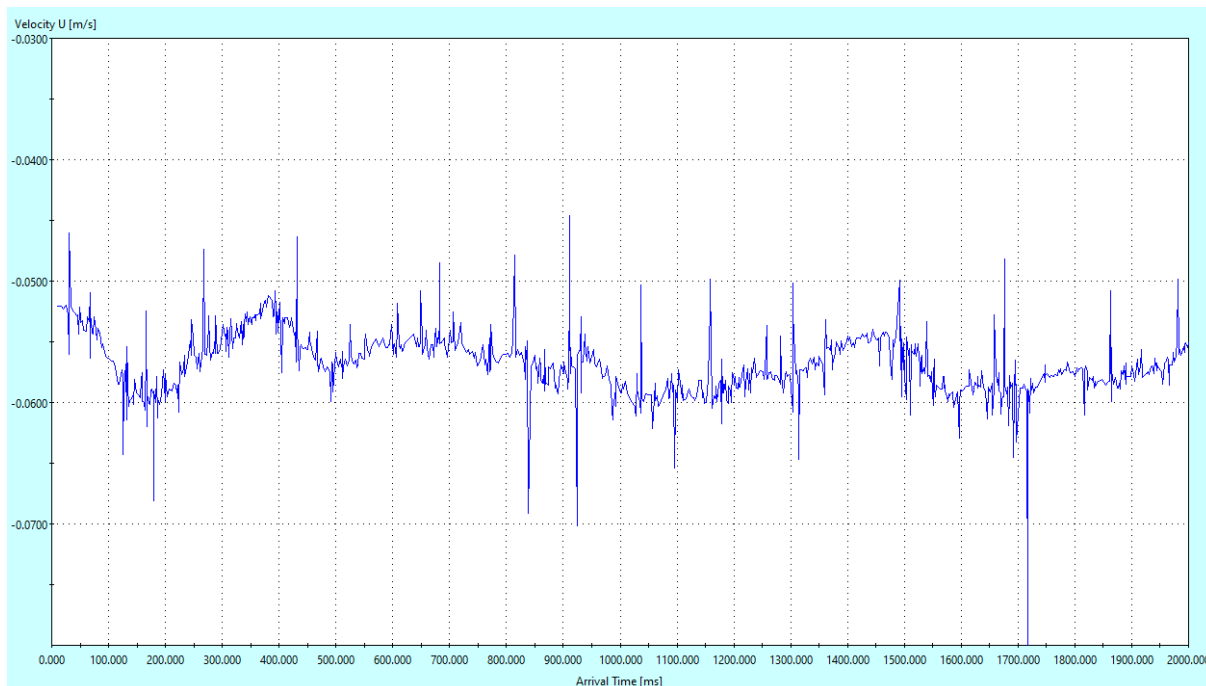


Obrázek č. 17: Měřicí prostor kalibrační trati

Před obdélníkovým kalibračním prostorem trati o šířce 160 mm a výšce 155 mm, který je znázorněn na obrázku č. 17, dochází k hydraulickým změnám. Ty jsou způsobeny rozšířením profilu potrubí na 200 mm a jeho opětovným zúžením na původních 150 mm, čímž dochází ke zrovnoměnění rychlostního pole. Jedná se o tzv. konfuzi neboli stlačení proudu, která při správném provedení způsobí, že rychlostí pole je podobné více pístovému proudu. Proud je uprostřed mnohem plošší, což téměř kompletně eliminuje rozdíly při kalibraci vodoměrných vrtulí o různých průměrech.

### 3.1.1 Typ proudění

V kalibrační trati je plně vyvinuté turbulentní proudění. To znamená, že má charakter velkého množství nerovnoměrně přes sebe namodelovaných vln. Jako každý jiný hydraulický okruh i tento má svou vlastní frekvenci, která se pohybuje okolo 1-2 s, což budí dojem jakoby trať „dýchala“. Jedná se o neovlivnitelnou vlastnost všech hydraulických okruhů, i přes to, že čerpadlo a vše ostatní pracuje pořád stejně. Abychom byli schopni naměřit časově správnou střední hodnotu rychlosti, musíme měřit dostatečně dlouhou dobu, aby se všechny jevy stačily projevit několikrát.



*Obrázek č. 18: Turbulentní proudění při frekvenci 2 Hz v bodě č. 20 ze dne 13. 06. 2019 zachycené pomocí softwaru BSA Flow v.6.60 v průběhu dvou sekund*

## 3.2 Použitá LDA aparatura

Všechny prvky zmíněné v kapitole 3.2.1 tvoří kompaktní měřicí aparaturu s názvem Flow Explorer DPSS 300 2D od firmy Dantec Dynamics. V rámci této aparatury není možné provádět uživatelské úpravy nastavení jednotlivých prvků.



### 3.2.1 Laser

Uvnitř soupravy Flow Explorer DPSS 300 2D (dále jen „*Flow Ex*“) se skrývají dva nezávislé pevnolátkové lasery o výkonu 300 mW. První laser emituje laserové světlo o vlnové délce 532 nm, což odpovídá zelené barvě. Druhý emituje laserové světlo s vlnovou délkou 561 nm, která odpovídá žluté barvě.



Obrázek č. 19: Laserová aparatura připevněná na posuvných kolejničích

První optický prvek, kterým svazek prochází, je polopropustné zrcadlo, kde dojde k rozdělení laserového svazku na dvě části. V podstatě se jedná o skleněný hranol s napařenou kovovou vrstvou, který je instalován pod úhlem 45°. Za tímto optickým prvkem následuje další zrcadlo, které odkloněný laserový svazek nasměruje stejným směrem jako svazek původní, neodkloněný, čímž vznikne souběžná dvojice laserových svazků pocházejících z jednoho laseru.

Skutečnost, že pochází z jednoho laseru je pro účely měření velmi důležitá, jelikož mají absolutně stejnou vlnovou délku i fázi. Jinými slovy lze říci, že jsou koherentní. Jeden ze svazků projde přes Braggovu celu, kde dojde k optoelektrickému shiftu neboli posunu frekvence laserového svazku o 80 MHz.

### **3.2.2 Čočka**

Po průchodu přes Braggovu celu přichází na řadu spojná čočka, která způsobuje sbíhavost dříve rovnoběžných laserových svazků. Jedná se o jedinou část optické soustavy Flow Ex, kterou je uživatelsky možné měnit. Pro účely tohoto měření byla použita čočka s ohniskovou vzdáleností 300 mm. V ohnisku pak dojde k protnutí svazků, čímž získáme optickou sondu, kde dochází k interferenci svazků. Díky posunutí frekvenci jednoho svazku o 80 Hz je možné optickou sondou měřit i nulovou rychlost.

### **3.2.3 Optická sonda**

Velikost a tvar optické sondy je ovlivněn roztečí svazků, ohniskovou vzdáleností čočky a průměrem laserových svazků. Flow Ex má rozteč svazků 60 mm a tloušťka svazků činí 1,8 mm. Tvar samotné sondy má proto protáhlý elipsoidní tvar o rozměrech 0,1135 x 0,1129 x 1,135 mm.

Vytvořená optická sonda je zdrojem signálu, který je tvořen okem neviditelnými záblesky světla od unášených mikro částic. Při okrajích sondy je zachycený signál přirozeně slabší. Jelikož je však pro LDA směrodatná frekvence, a nikoliv síla signálu, je tato skutečnost nedůležitá.

Zpětně odražený signál z optické sondy je nutné pomocí objektivu zachytit. Na použité měřicí aparatuře je k tomuto účelu použita stejná 300 mm čočka, která „optický kužel dat“ převede na válec a nasměruje jej do skleněného vlákna. Světelný signál putující do skleněného vlákna, jehož zařazení do aparatury bylo zvoleno zejména z důvodu snazší manipulace se soupravou, je nutné přesně zaměřit do jeho osy, jelikož při vhodné optimalizaci má téměř nulové ztráty.

### **3.2.4 Dělič barev**

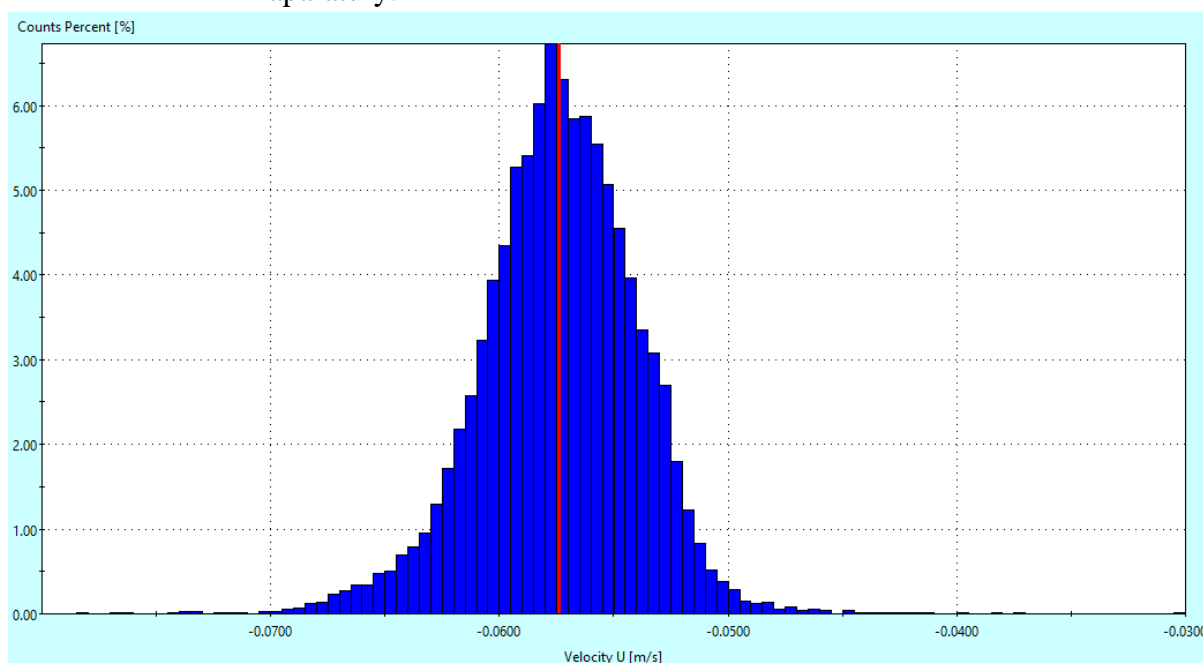
Data dále putují do děliče barev, což jsou opět polopropustná zrcadla s napařenými kovovými vrstvami. Slouží k oddělení jednotlivých barev – resp. blokují průchod jiných vlnových délek. I přes skutečnost, že při konkrétním měření byla použita pouze jedna vlnová délka, je nutné dělič barev použít a blokovat tím i přirozené světlo pronikající do laboratoře, jelikož může být chápáno jako vlnění. Rovněž je třeba odstranit naměřený šum, který představují zbytkové okolní vlnové délky. Šum je sice nepatrný, ale pro optiku velmi významný. Výstupní vlnová délka je potom totožná s vlnovou délkou vyslanou laserem.

### 3.2.5 Fotonásobič

Poslední optoelektrickou součástí před vstupem do počítače je fotonásobič, což je zařízení citlivější než lidské oko. Dokáže zachytit optickou informaci odpovídající příslušné vlnové délce. Při měření byl fotonásobič nastaven na hodnotu buzení 1000 V s použitým zesílením 22 dB.

## 3.3 Software

Z fotonásobiče přichází zaznamenaný signál přes jednoúčelový počítač BSA Procesor F 600 2D do softwarového rozhraní BSA flow v.6.60, které slouží jako komplexní ovládací centrum celé měřicí aparatury.



Obrázek č. 20: Histogram rychlostí při frekvenci 2 Hz v bodě č. 20 ze dne 13. 06. 2019 zachycený pomocí softwaru BSA Flow v.6.60

Podle nastavené frekvence pohonu čerpadla je možné přibližně odhadnout rychlost proudění v trati, podle čehož vybereme vhodné nastavení softwaru. K tomu účelu slouží zkušební online měření (z angličtiny „*repetition mode*“), pomocí kterého je program schopný vytvořit histogram dosahovaných rychlostí. Ten uživateli spolu s dalšími ukazateli napoví, zda je jeho nastavení vhodné.



Z histogramu lze vyčíst především četnost dosahovaných rychlostí v dané šířce pásma, které mají tvar „Gaussova klobouku“. Zkušební měření je možné zastavit, provést korekci vstupních parametrů a spustit jej znova. Cílem je pokrýt „Gaussovým kloboukem“ co největší část zvoleného pásma, čímž dosáhneme nejlepších výsledků. Histogram však nesmí zasahovat ani kouskem mimo zvolené pásmo, jelikož by došlo ke značnému ovlivnění všech měřených dat, zejména pak střední kvadratické odchylky.

### **3.4 Popis měřicí metody**

Pro účely měření byla použita zpětná metoda, jejíž vhodnost byla ověřena srovnávacím měřením s metodou dopřednou, vůči které vykazovala proměnlivou odchylku v řádu desetin procent.

Zpětná metoda byla zvolena zejména z důvodu větší uživatelské přívětivosti, jelikož vyžaduje pouze jeden optický vstup do měrného prostoru trati. Dalším důvodem bylo snížení nároků na materiální vybavení, protože čočku bylo možné využít ke dvěma účelům současně, jak je uvedeno v bodech 3.2.2 a 3.2.3.

Všechny měřené rychlosti byly vykazovány jako záporné z důvodu systémového nastavení optiky v kombinaci se směrem proudění v hydraulickém okruhu.

Vzhledem ke skutečnosti, že v rámci této práce byla zvolena řada dvanácti frekvencí čerpadla, při kterých se provádělo měření, bylo nutné jednotlivé sady měření zařadit do vzestupné a sestupné řady frekvencí, čímž došlo k zamezení či minimálně zmírnění vlivu hystereze.

### **3.5 Nastavení softwaru**

V další fázi došlo k vytvoření sady všech kompletních voleb pro jednotlivé frekvence pohonu čerpadla, které zůstaly po celou dobu experimentu stejné, především z důvodu opakovatelnosti za stejných podmínek.

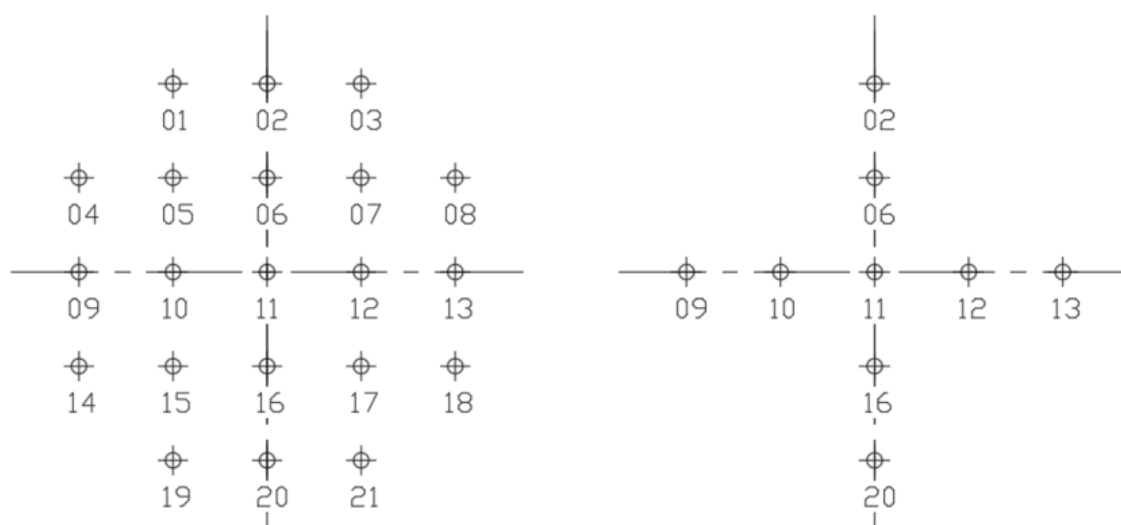
K tomuto účelu byl použit BSA flow software, kde se za pomoci vhodně zvoleného výkonu laseru v kombinaci s buzením fotonásobiče a šířkou pásma provedlo nastavení pro konkrétní podmínky podle bodu 3.3. Počet vzorků, které byly sejmuty a uloženy, byl podle rychlosti proudění zvolen na 20 000 nebo 40 000.

### 3.6 Zvolená měrná síť

Před zvolením vhodné velikosti měrného prostoru a sítě bodů bylo provedeno měření v oblasti celého kalibračního prostoru na čtvercové síti 7 x 7 bodů o délce hrany 120 mm z důvodu ověření rovnoměrnosti rozložení rychlostního pole v celém profilu potrubí. Grafický výstup, dle kterého je možné pozorovat ploché rychlostní pole, byl přiložen v přílohách práce.

Prvotní měrná síť pro účely bakalářské práce na základě výše zmíněného měření sestávala z 21 bodů, které byly uspořádány v mřížce 5 x 5 s vynecháním rohových bodů, aby bylo dosaženo kruhového obrazce. Rozestupy mezi sousedními body v kolmém směru byly zvoleny 10 mm. Po čtyřech sadách měření došlo k redukci měrné sítě na „kříž“ 5 x 5 bodů, především z důvodu snížení časové náročnosti měření.

Před samotnou redukcí byla pomocí srovnávacích výpočtů ověřena míra ovlivnění měření při všech zkoumaných frekvencích čerpadla, dle přílohy č. 5 této bakalářské práce. Bylo zjištěno, že průměrná odchylka činí 0,147 %, což je pro účely měření hodnota zcela zanedbatelná.



Obrázek č. 21: Vizualizace původní a redukované měrné sítě

### 3.7 Postup měření

Před začátkem samotného měření bylo vždy nejprve nutné připravit celou kalibrační trať k chodu, což zahrnuje:

- otevření vyrovnávací komory v horní části měřicího okruhu;
- uzavření měřicího prostoru „kalibračním víkem“;
- zapojení digitálního teploměru v kalibračním prostoru;
- zapnutí frekvenčního měniče a spuštění čerpadla na plný výkon k promísení usazených částic;
- zapnutí otáčkoměru čerpadla;
- zapnutí automatického traverzačního systému;
- zapnutí BSA procesoru F 600 2D;
- zapnutí měřicí aparatury Flow Ex;
- uvedení chladicí aparatury do pohotovostního režimu;
- zapnutí softwarového rozhraní BSA flow;
- zapnutí softwarového rozhraní laseru Cobolt monitor.

V další fázi byla provedena kontrola všech zapojených komponent. Předně důležité bylo zkontrolovat správnou výchozí pozici měřicí aparatury Flow Ex a tím i optické sondy, což souviselo i s kontrolou správné pozice traverzačního zařízení v souřadném systému.

Po provedení fyzické kontroly následovalo nastavení frekvenčního měniče čerpadla na požadovanou hodnotu. Dle tohoto údaje bylo současně vybráno příslušné softwarové nastavení v programu BSA flow, které bylo později ověřeno dle pokynů v bodě 3.3 této práce.

Po provedení výše zmíněných úkonů bylo možné zahájit samotné měření. Záznam dat o rychlostech proudění probíhal automaticky v průběhu celého měření a v každém bodě trval 15-30 sekund. Manuálně bylo nutné provádět pouze záznam teploty a otáček čerpadla v průběhu měření. V případě, že teplota vody v trati překročila 24 °C, bylo nutné uvést do chodu chladicí zařízení k její redukci. Dále se v průběhu měření porovnával histogram měřených a nastavených rychlostí k zajištění správnosti zaznamenávaných dat.

Po skončení jednoho měření byl proveden export naměřených dat do textového souboru, změněna frekvence čerpadla dle bodu 3.4 a provedeno nové měření s příslušným softwarovým nastavením až do vyčerpání všech dvanácti frekvencí.

Po naměření a exportování dat bylo nutné všechny prvky trati uvést do původního stavu. Zvláštní pozornost bylo třeba věnovat automatickému traverzačnímu systému, u kterého se muselo manuálně „přejít“ do výchozí měřicí pozice, a pak posléze resetovat osy, jelikož po jeho vypnutí se tato akce již nedala provést.

Postup záznamu a zpracování naměřených dat byl rovněž názorně zobrazen v přílohách s ohledem na časovou posloupnost jednotlivých úkonů.

## 4 VÝSLEDKY A DISKUSE

Cílem bakalářské práce bylo stanovit vlastnosti kalibrační trati, zejména pak stabilitu rychlostního pole v čase a jeho případný vývoj za pomoci určení středních hodnot rychlosti a středních kvadratických odchylek. V průběhu každého z patnácti měření bylo zaznamenáno přes 3 000 000 hodnot rychlosti a 60 hodnot o průběhu otáček a teplot v trati. Pro každé z těchto měření byla stanovena závislost rychlosti na otáčkách.

Z těchto hodnot byla sestavena souhrnná tabulka, která dále sloužila jako podklad pro graf závislosti rychlosti na čase a pro graf závislosti procentuálních odchylek jednotlivých měření od středních hodnot.

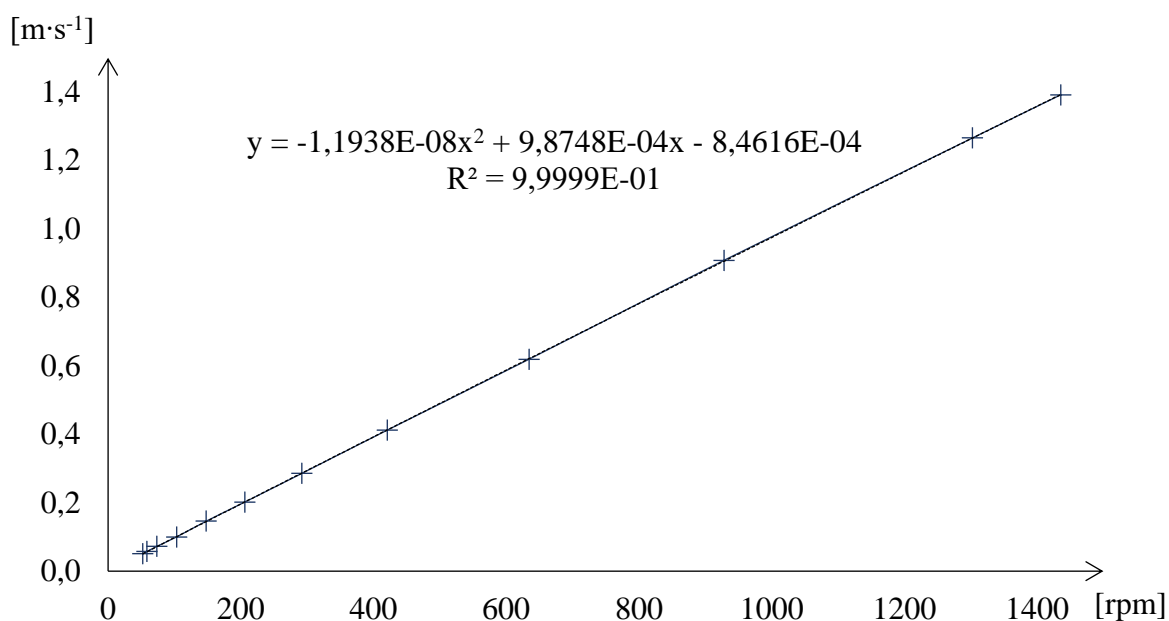
### 4.1 Stanovení závislosti rychlosti na otáčkách jednotlivých měření

Pro každé z patnácti měření byly nejprve vypočteny průměrné hodnoty rychlosti ze všech měrných bodů při daných otáčkách čerpadla. Výsledky jedné sady měření jsou znázorněny v tabulce č. 1. Z těchto hodnot byl vytvořen graf č. 1.

*Tabulka č. 1: Průměrné hodnoty měřených veličin ze dne 13. 06. 2019*

frekvence	průměrné otáčky	teplota	rychlost – kříž	rychlost – plná síť
[Hz]	[rpm]	[°C]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]
1.8	52.28	23.36	0.0509	0.0509
2.0	58.53	22.10	0.0572	0.0575
2.5	73.28	21.66	0.0722	0.0720
3.5	103.34	21.52	0.1001	0.1005
5.0	147.97	21.18	0.1461	0.1463
7.0	206.15	21.60	0.2020	0.2017
10.0	291.85	21.34	0.2854	0.2855
15.0	420.72	21.42	0.4120	0.4125
23.0	634.51	22.00	0.6192	0.6192
35.0	928.09	21.74	0.9079	0.9082
48.0	1302.89	23.28	1.2657	1.2661
53.0	1435.69	22.96	1.3914	1.3916

Z tabulky č. 1 je patrné, že se jedná o měření, u kterého ještě nebyla redukována síť měrných bodů, jak je popsáno v bodě 3.6. Rovněž je vidět, že rozdíly naměřených rychlostí byly zanedbatelné při všech frekvencích čerpadla a teplotách kalibrační trati.



*Graf č.1: Závislost rychlosti na otáčkách ze dne 13. 06. 2019*

V grafu č. 1 lze pozorovat téměř lineární závislost rychlosti proudění na otáčkách, nicméně z důvodu zvýšení přesnosti dat a vypovídající hodnoty výzkumu byly body v grafu proloženy spojnici trendu, která byla tvořena polynomem druhého stupně. Směrodatným ukazatelem je v rámci grafu rovněž koeficient spolehlivosti, jehož hodnota činí 0,99999. Z tohoto faktu lze usuzovat, že měření bylo velmi přesné.

## 4.2 Stanovení celkové závislosti rychlosti na referenčních otáčkách

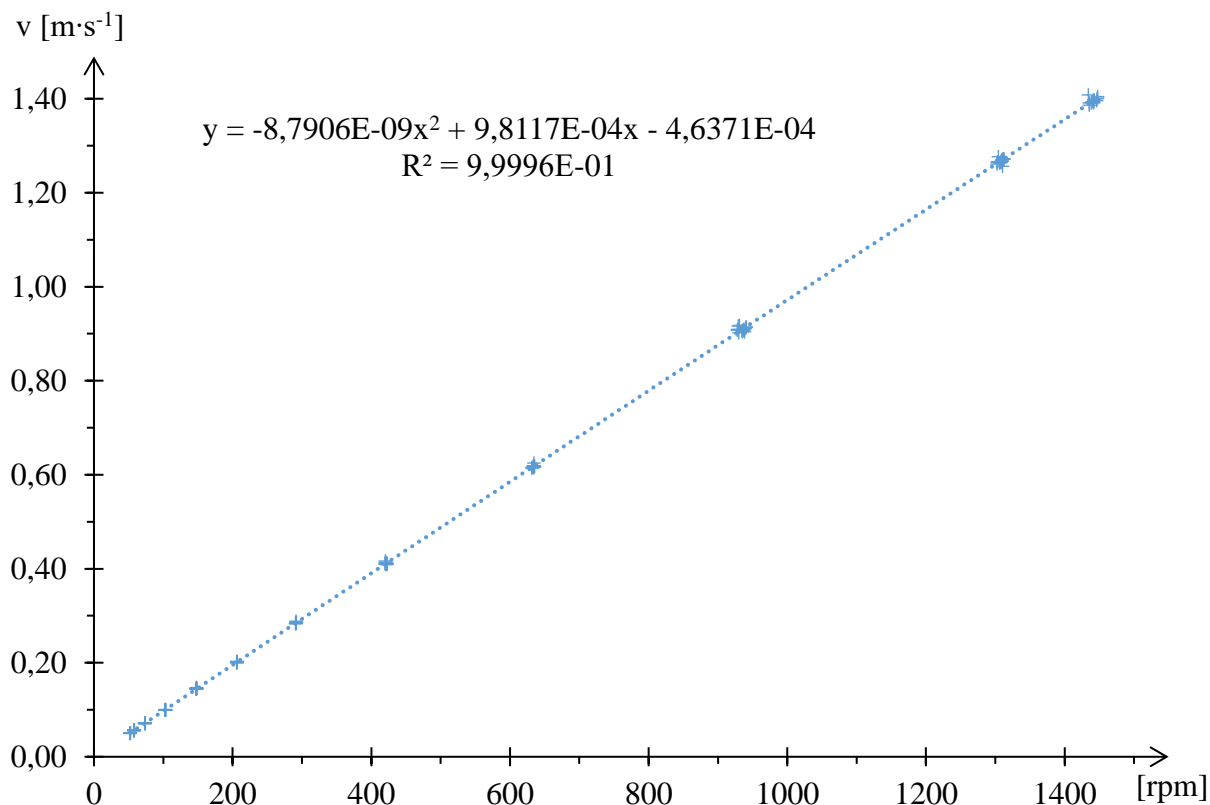
Po stanovení průměrných hodnot a vytvoření grafů závislosti pro jednotlivá měření byla sestavena tabulka č. 2 s referenčními otáčkami, které byly vhodně zvoleny. V tabulce č. 2 lze pozorovat přímou úměrnost mezi otáčkami a rychlostmi jednotlivých měření. Měření v levém horním rohu tabulky byla po analýze všech dat vyřazena z důvodu chybně naměřených hodnot.

Přestože při měření každé sady byly nastaveny vždy stejné frekvence pohonu čerpadla, otáčky nebyly zcela stejné. Aby bylo možné porovnat výstupy ze všech opakovaných sad měření, byly z proložených polynomických funkcí vypočteny rychlosti ve zvolené řadě otáček.

Tabulka č. 2: Referenční hodnoty rychlosti

	28.03. 2019	03.05. 2019	13.06. 2019	04.07. 2019	07.08. 2019	27.09. 2019	07.11. 2019	13.12. 2019
otáčky	průměrné hodnoty rychlosti							
[rpm]	[m·s <sup>-1</sup> ]							
52	-	-	0.0505	0.0513	0.0507	0.0507	0.0508	0.0510
65	-	-	0.0633	0.0642	0.0634	0.0633	0.0634	0.0636
80	-	-	0.0781	0.0791	0.0781	0.0780	0.0780	0.0782
100	-	0.0973	0.0978	0.0989	0.0976	0.0975	0.0975	0.0977
150	0.1461	0.1472	0.1470	0.1484	0.1464	0.1462	0.1461	0.1463
250	0.2449	0.2466	0.2453	0.2473	0.2440	0.2436	0.2433	0.2435
350	0.3434	0.3455	0.3433	0.3460	0.3413	0.3410	0.3403	0.3405
500	0.4904	0.4929	0.4899	0.4938	0.4871	0.4868	0.4857	0.4860
700	0.6852	0.6877	0.6845	0.6903	0.6809	0.6811	0.6792	0.6797
900	0.8785	0.8805	0.8782	0.8861	0.8741	0.8750	0.8722	0.8731
1150	1.1181	1.1188	1.1190	1.1300	1.1147	1.1169	1.1128	1.1143
1450	1.4026	1.4006	1.4059	1.4213	1.4021	1.4065	1.4006	1.4032

	14.01. 2020	04.02. 2020	02.03. 2020	17.03. 2020	03.04. 2020	23.04. 2020	06.05. 2020
otáčky	průměrné hodnoty rychlosti						
[rpm]	[m·s <sup>-1</sup> ]						
52	0.0504	0.0507	0.0514	0.0508	0.0508	0.0503	0.0505
65	0.0631	0.0634	0.0641	0.0634	0.0634	0.0630	0.0632
80	0.0778	0.0780	0.0787	0.0780	0.0780	0.0777	0.0778
100	0.0973	0.0976	0.0981	0.0975	0.0975	0.0973	0.0973
150	0.1461	0.1464	0.1468	0.1462	0.1462	0.1462	0.1461
250	0.2436	0.2439	0.2439	0.2434	0.2434	0.2439	0.2436
350	0.3410	0.3413	0.3408	0.3406	0.3405	0.3414	0.3410
500	0.4869	0.4872	0.4858	0.4861	0.4860	0.4873	0.4867
700	0.6810	0.6813	0.6785	0.6798	0.6795	0.6811	0.6806
900	0.8747	0.8749	0.8703	0.8732	0.8726	0.8741	0.8739
1150	1.1162	1.1162	1.1091	1.1144	1.1134	1.1142	1.1149
1450	1.4052	1.4047	1.3940	1.4030	1.4013	1.4007	1.4028



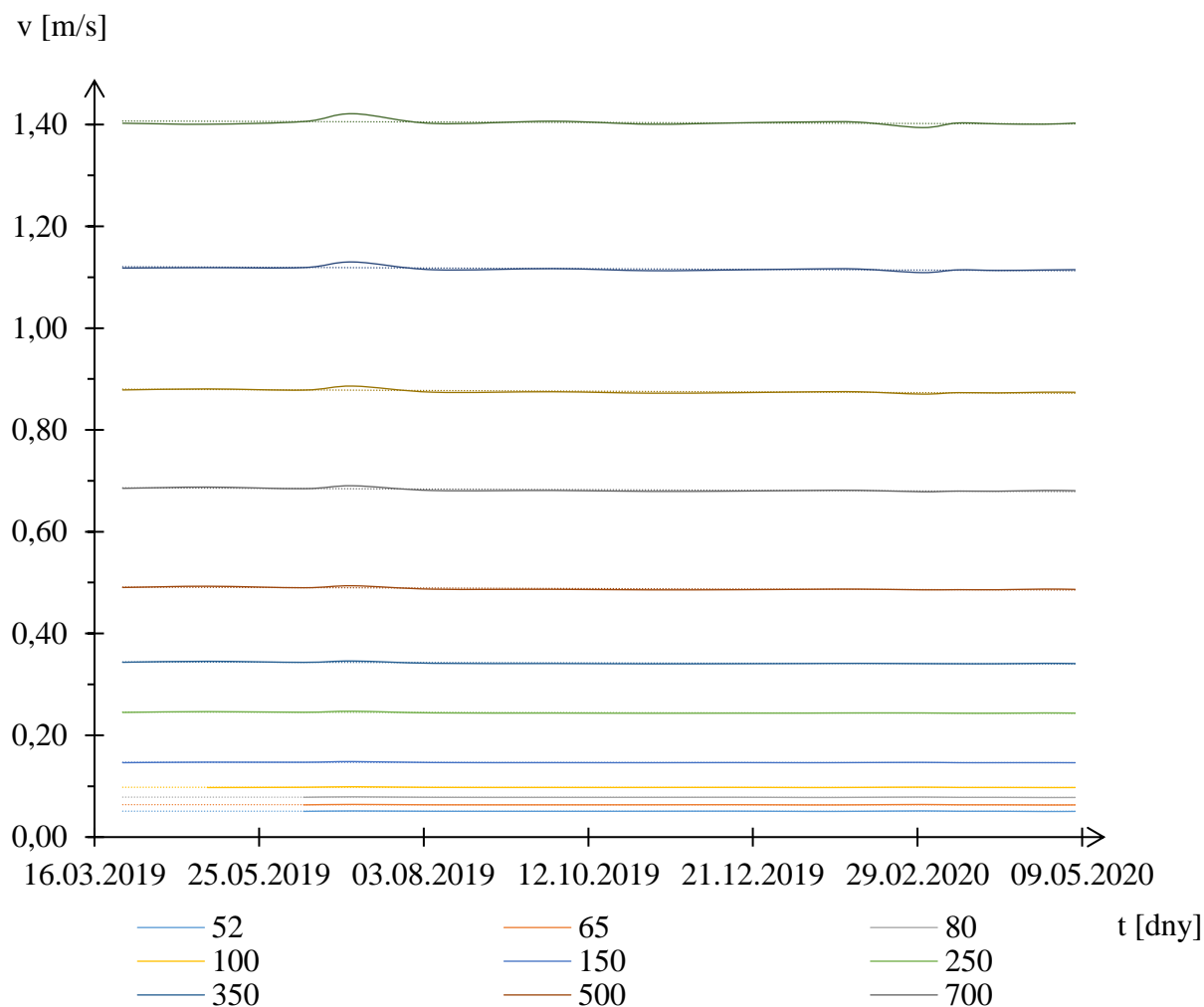
*Graf č. 2: Celková závislost rychlosti na referenčních otáčkách*

Graf č. 2 představuje kumulativní zobrazení jednotlivých měření při všech frekvencích, a proto u něj lze pozorovat i obdobný trend závislosti rychlosti proudění na otáčkách. Hodnoty byly opět proloženy polynomem druhého stupně, z jehož rovnice byl proveden výpočet celkové střední hodnoty rychlosti pro jednotlivé referenční otáčky. Koeficient spolehlivosti je 0,99996, tedy téměř jedna, což opět indikuje velmi přesný výsledek.



### 4.3 Stanovení závislosti rychlosti na čase

Pro stanovení závislosti měřených rychlostí proudění na čase byl sestaven graf č.3, který zobrazuje časový vývoj za stanovené období více než jednoho roku pro jednotlivé interpolované otáčky. Tento graf byl vytvořen z referenčních rychlostí, aby bylo možné provést vypovídající srovnání.



Graf č. 3: Závislost rychlosti na čase při referenčních otáčkách

Z grafu č. 3 je patrné, že střední hodnoty rychlostního pole pro jednotlivá měření byla při všech otáčkách v čase stabilní a ve většině případů vykazují velmi nevýznamné rozdíly. Pro větší názornost byly grafem proloženy lineární spojnice trendu, které symbolizují jakousi vztaznou hodnotu rychlosti.

Pomocí tohoto nástroje bylo možné odhalit odchylky od průměrných hodnot u měření ze dne 04. 07. 2019 a 02. 03. 2020, které byly patrné zejména při vyšších rychlostech. Důvod vzniku odchylek nebylo možné s jistotou určit, nicméně jako nejpravděpodobnější příčina byl stanoven lidský faktor při nekonzistentním zápisu otáček.

#### 4.4 Stanovení středních hodnot a střední kvadratické odchylky

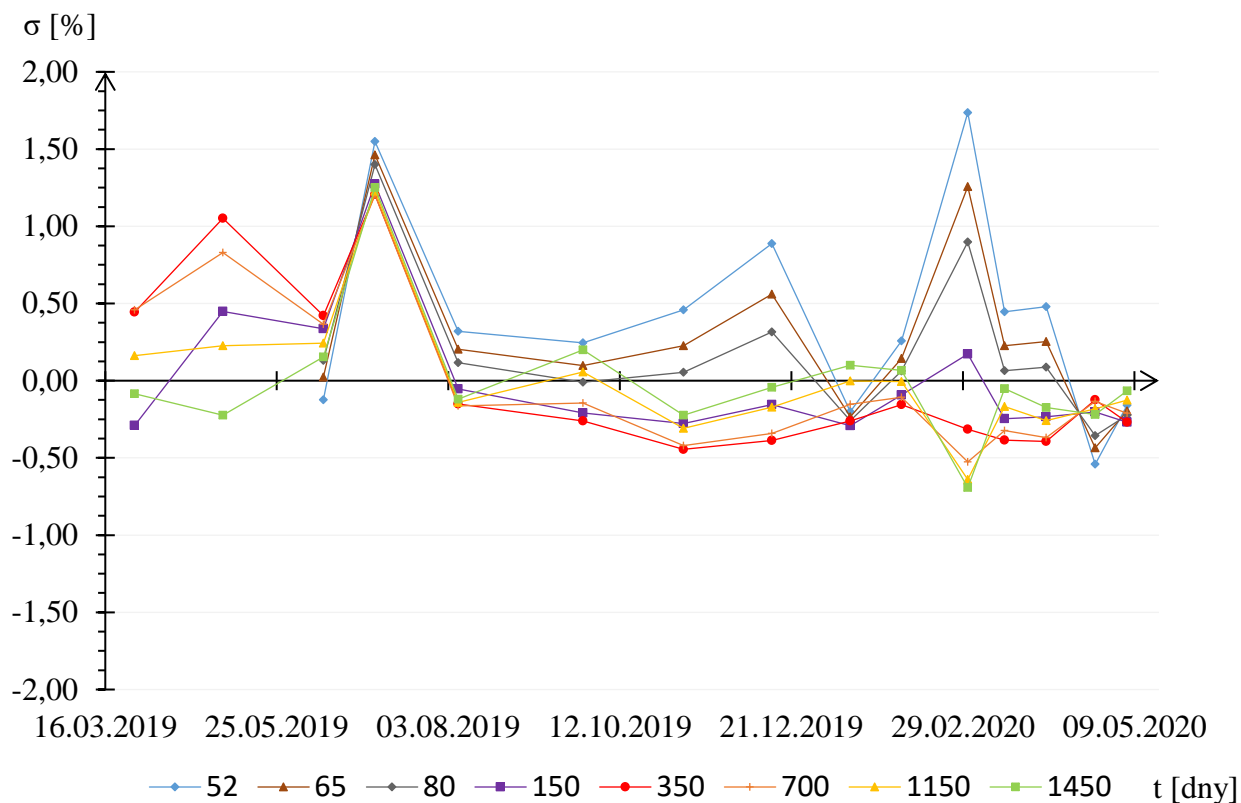
Po provedení přepočtu všech rychlostí podle referenčních otáček byly stanoveny střední hodnoty rychlosti, jejich střední kvadratické a procentuální odchylky, které jsou uvedeny v tabulce č. 3. Stanovení těchto hodnot bylo klíčovou částí práce.

*Tabulka č. 3: Průměrné hodnoty rychlosti a střední kvadratické odchylky*

otáčky	střední hodnoty rychlosti	střední kvadratická odchylka	procentuální odchylka
[rpm]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[%]
52	0.0507	0.0002	0.4728
65	0.0634	0.0002	0.3761
80	0.0781	0.0003	0.3205
100	0.0976	0.0003	0.2872
150	0.1465	0.0004	0.3007
250	0.2443	0.0009	0.3787
350	0.3419	0.0014	0.4174
500	0.4879	0.0020	0.4186
700	0.6820	0.0026	0.3821
900	0.8754	0.0029	0.3287
1150	1.1162	0.0029	0.2600
1450	1.4036	0.0034	0.2418

Z tabulky č. 3 je patrné, že střední kvadratická odchylka, u níž lze pozorovat přímou úměrnost vůči rychlosti proudění, se pohybovala v rozmezí 0,0002-0,0034 m·s<sup>-1</sup>. Procentuální odchylka byla naopak u nejnižších rychlostí proudění nejvyšší i přes to, že hodnota střední kvadratické odchylky byla poměrně nízká. Tato skutečnost byla způsobena tím, že nárůst rychlosti proudění byl oproti nárůstu střední kvadratické odchylky mnohonásobně vyšší, čímž došlo ke zmenšení jejího vlivu na měření.

Hodnoty procentuální odchylky, které se pohybovaly v rozmezí 0,242-0,473 % jsou velmi příznivé, jelikož při všech rychlostech zůstaly nižší než půl procenta. S ohledem na skutečnost, že měřicí aparatury se běžně kalibrují s nižší mírou přesnosti, jedná se o vynikající výsledek.



Graf č. 4: Procentuální odchylky měření od středních hodnot

Z grafu č. 4 lze vyčíst procentuální odchylky jednotlivých měření od dlouhodobých středních hodnot pro vybrané referenční otáčky. Největších odchylek bylo dosaženo při nejnižších rychlostech a nejmenších naopak při vysokých rychlostech, což koresponduje s tabulkou č. 3. Zvětšený graf pro všechny referenční otáčky byl z důvodu lepší čitelnosti připojen v přílohách.

Hodnoty naměřené 04. 07. 2019 a 02. 03. 2020 vykazovaly vyšší odchylky oproti zbytku. Znepokojivě vypadalo především první jmenované měření, jelikož při všech rychlostech vykazovala odchylka téměř totožnou hodnotu. Z tohoto důvodu lze usuzovat na skutečnost, že odchylku způsobil lidský faktor, což potvrzují i hodnoty z grafu č. 3.

Odchylky zbývajících měření již vypadají většinou velmi přívětivě, jelikož při všech rychlostech zůstaly pod hodnotou jednoho procenta, což je hodnota, která se dá považovat za „svatý grál“ všech výzkumných pracovníků.

## 5 ZÁVĚR

Teoretická část bakalářské práce pojednávala o účelu měření rychlosti, nutnosti kalibrace jednotlivých měřidel a jejich podmínkách. Dále byl v práci uveden výčet jednotlivých měřicích metod se zaměřením na proudění kapalin a plynů v technické praxi.

V experimentální části byly pomocí metody LDA stanoveny střední hodnoty rychlosti proudění v kalibrační trati pro jednotlivé referenční otáčky a jejich střední kvadratické odchylky. Pro větší přehlednost byly přidány i procentuální odchylky. S ohledem na velké množství naměřených dat lze považovat výsledky za jasně vypovídající.

Z výsledků měření tak bylo stanoveno, že procentuální odchylky od středních hodnot rychlosti při jednotlivých referenčních otáčkách klesají se zvyšující se rychlostí. Nejvyšší odchylka 0,473 % tedy byla naměřena při nejnižší rychlosti  $0,0507 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a referenčních otáčkách 52 otáček za minutu. Nejnižší odchylka 0,242 % byla naopak naměřena při nejvyšší rychlosti  $1,4036 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a 1450 otáčkách za minutu. S ohledem na stanovené hodnoty procentuálních odchylek lze trať označit jako vhodnou pro účely referátu posuzování způsobilosti užití a legalizace EMI měřidel.

Slabým místem měření byl manuální zápis otáček, kde se částečně projevil lidský faktor ve smyslu nepravidelných intervalů zápisu v průběhu měření. Při měření závislosti rychlosti proudění na čase může v některých případech docházet k jisté hysterezi, tzn. mírnému vývoji rychlosti v průběhu měření. V případě, kdy obsluha trati zaznamenala více dat například v první fázi měření, jim takto přisoudila vyšší váhu a došlo ke zkreslení střední hodnoty. Z tohoto důvodu pro budoucí výzkum doporučuji instalovat automatický zapisovač otáček, který bude provádět zápis v pevně daných intervalech.

## 6 BIBLIOGRAFIE

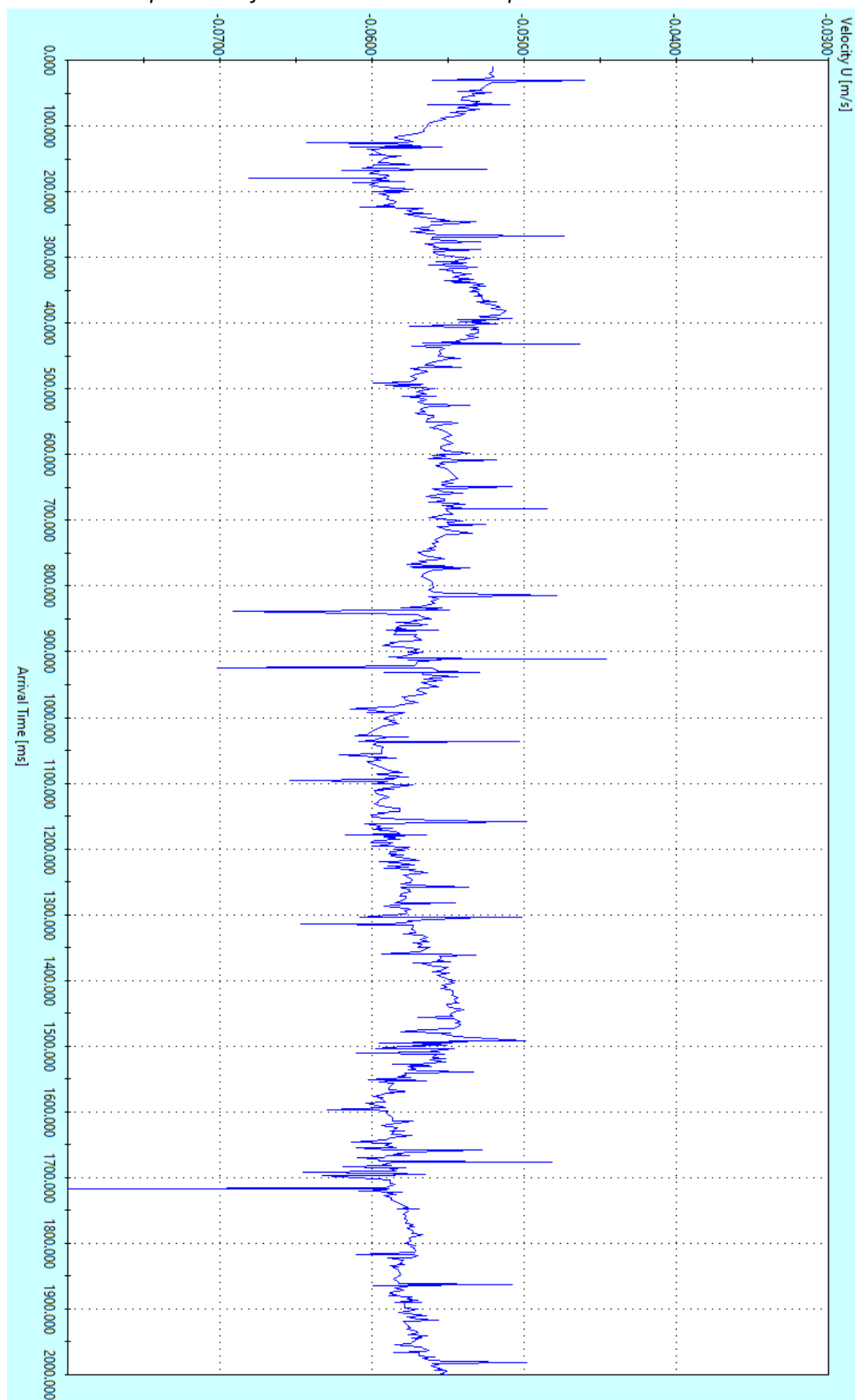
- [1] ŽOUŽELA, Michal, Pavel ZUBÍK, Jiří BŘEZINA a Martin VÍTŮ. Metrologické charakteristiky elektromagnetických měřidel bodové rychlosti vodního proudu. *Metrologie*. Praha: Bořivoj Kleník, 2020, **29**(2), 8, 37 s. ISSN 1210-3543.
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 1198 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [3] BOOR, Boris, Jiří KUNŠTÁTSKÝ a Cyril PATOČKA. *Hydraulika pro vodohospodářské stavby*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1968, 516 s. : il.
- [4] Representation of the laminar and turbulent flow in the pipe. In: *US Didactic* [online]. Orlando, 2003 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: [http://www.usdidactic.com/teaching-lab-equipment/i4320\\_Zeichnung\\_Einzelheit\\_1.htm](http://www.usdidactic.com/teaching-lab-equipment/i4320_Zeichnung_Einzelheit_1.htm)
- [5] MATTAS, Daniel. *Praktické cvičení z hydrometrie*. Praha, 2001, 24 s. Dostupné z: [http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydrology/vyuka/VYZ1/files/prakticke\\_cviceni.pdf](http://hydraulika.fsv.cvut.cz/Hydrology/vyuka/VYZ1/files/prakticke_cviceni.pdf)
- [6] OTT C2. In: *HYDROMETRICS s. r. o.* [online]. Nehvizdy, 2017 [cit. 2020-04-09]. Dostupné z: <http://www.hydrometrics.cz/main-navigation/ott-produkty/prutok-173/>
- [7] ČSN ISO 3455. *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Kalibrace vodoměrných vrtulí s rotačním prvkem v přímých otevřených nádržích*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1994, 12 s. 259322.
- [8] ČSN ISO 2537. *Měření průtoku kapalin v otevřených korytech. Vodoměrné vrtule s rotačním prvkem*. 3. vydání. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 1993.
- [9] ČSN EN ISO 748. *Hydrometrie - Měření průtoku kapalin v otevřených korytech použitím vodoměrných vrtulí nebo plováků*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 259310.
- [10] Basic User Manual: Sensor components. In: *OTT HydroMet* [online]. Kempten, 2019 [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.ott.com/en-us/products/download/ott-mf-pro-basic-user-manual-eu-version/>
- [11] MEJIA-ALVAREZ, Ricardo a Hussam JABBAR. Maschinenbau: Hot-Wire-Messung. In: *JoVE* [online]. Cambridge: MA, 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.jove.com/science-education/10464/hot-wire-messung?language=German>
- [12] MUNSON, Bruce, Donald YOUNG, Theodore OKIISHI a Wade HUEBSCH. *Fundamentals of fluid mechanics*. 6th edition. Hoboken: Wiley, 2009. ISBN 978-0-4702-6284-9.
- [13] HAPALA, Radim. *Větrání kabiny osobního automobilu – výzkum charakteru proudění z rozmrazovací mřížky předního skla a účinnost tohoto systému*. [online]. Brno, 2009, 70 s. [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=17895](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17895). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. František Lízal.

- [14] BANDARA, Priyantha. A constant current hotwire anemometer. In: *Semantic Scholar* [online]. 2011 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/a-constant-current-hotwire-anemometer-Bandara/b4391d9863cbab5904c1c8a1be331612d6dcd368#references>
- [15] STORNELLI, V., G. FERRI, A. LEONI a L. PANTOLI. The assessment of wind conditions by means of hot wire sensors and a modified Wheatstone bridge architecture. *Sensors and Actuators A: Physical* [online]. 2017, , 130-139 [cit. 2020-04-21]. ISSN 0924-4247. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924424717307914#fig0015>
- [16] ZUBÍK, Pavel. Porovnání anemometrických měřicích metod. In: *Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/porovnan.htm>
- [17] ZUBÍK, Pavel. LDA. In: *Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn1.htm>
- [18] *Electrodynamic Fields: The Boundary Value Point of View: 13.1 Introduction to TEM Waves* [online]. Massachusetts: MIT Press, 2008 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: [http://web.mit.edu/6.013\\_book/www/navigate13.html](http://web.mit.edu/6.013_book/www/navigate13.html)
- [19] The Hermite-Gaussian resonator mode TEM00 corresponds to a perfect Gaussian beam. In: *Edmund optics* [online]. Barrington, USA, 2020 [cit. 2020-04-08]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.com/knowledge-center/application-notes/lasers/laser-resonator-modes/>
- [20] DANTEC DYNAMICS A/S, . *BSA Flow Software: Installation & User's guide*. Eight edition. Skovlunde, 2003.
- [21] Doppler effect vector illustration. In: *Dreamstime* [online]. Brentwood, c2000-2020 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.dreamstime.com/doppler-effect-vector-illustration-labeled-educational-physical-sound-light-scheme-educational-explanation-why-waves-frequency-image165141826>
- [22] GJELSTRUP, Palle. The new FlowExplorer DPSS: compact, powerful and calibrated LDA optics. In: *Opli* [online]. Sede-Ilan, c2006-2013, **2013** [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: [https://www.opli.net/opli\\_magazine/eo/2013/dantec-the-new-flowexplorer-dpss/](https://www.opli.net/opli_magazine/eo/2013/dantec-the-new-flowexplorer-dpss/)
- [23] Measurement principles of PIV. In: *Dantec Dynamics* [online]. Skovlunde, 2020 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/solutions-applications/solutions/fluid-mechanics/particle-image-velocimetry-piv/measurement-principles-of-piv/>
- [24] ZUBÍK, Pavel. Základní princip PIV. In: *Vysoké učení technické v Brně: Fakulta stavební* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-04-21]. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/zkladn2.htm>
- [25] ZUBÍK, Pavel. *Integrální laserová anemometrie*. Brno, 2001, 22 s. ISBN 80-214-1965-2. Dostupné z: <https://www.fce.vutbr.cz/VST/zubik.p/thesis.pdf>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.

- [26] DRÁHOVÁ, Věra. *Vizualizace vlivu syntetizovaných proudů na teplotní pole metodou PLIF* [online]. Liberec, 2011, 43 s. [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: [https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/10834/bc\\_20347.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/10834/bc_20347.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. Technická univerzita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Darina Jašíková.
- [27] POELMA, Christian. Recent Developments in Ultrasound Imaging Velocimetry: toward Clinical Application. In: *International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering* [online]. Delft, 2012, s. 6 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: [https://www.isud-conference.org/proc/split/ISUD-08\\_053\\_Poelma.pdf](https://www.isud-conference.org/proc/split/ISUD-08_053_Poelma.pdf)
- [28] POELMA, Christian. Ultrasound Imaging Velocimetry: a review. *Experiments in fluids* [online]. Basel, 2017, **2017**(3), 58 [cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00348-016-2283-9>
- [29] Ultrasonic Velocity Profile (UVP) Monitor. In: *ČVUT: Fakulta stavební* [online]. Praha, 2007 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: [http://kzei.fsv.cvut.cz/cs/vybaveni/vybaveni\\_hala/vybaveni\\_uvpmain](http://kzei.fsv.cvut.cz/cs/vybaveni/vybaveni_hala/vybaveni_uvpmain)
- [30] Ultrasonic Doppler and Time of Flight Flow Meters. In: *The Engineering ToolBox* [online]. 2001 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: [https://www.engineeringtoolbox.com/ultrasonic-doppler-flow-meter-d\\_495.html](https://www.engineeringtoolbox.com/ultrasonic-doppler-flow-meter-d_495.html)
- [31] UVP Concept. In: *Metflow S.A* [online]. 2020 [cit. 2020-05-23]. Dostupné z: <https://www.metflow.com/technology/uvp-concept/>
- [32] Doppler Ultrasonic Insert Velocity Sensor. In: *In-situ* [online]. 2020 [cit. 2020-05-24]. Dostupné z: <https://in-situ.com/doppler-ultrasonic-insert-velocity-sensor>

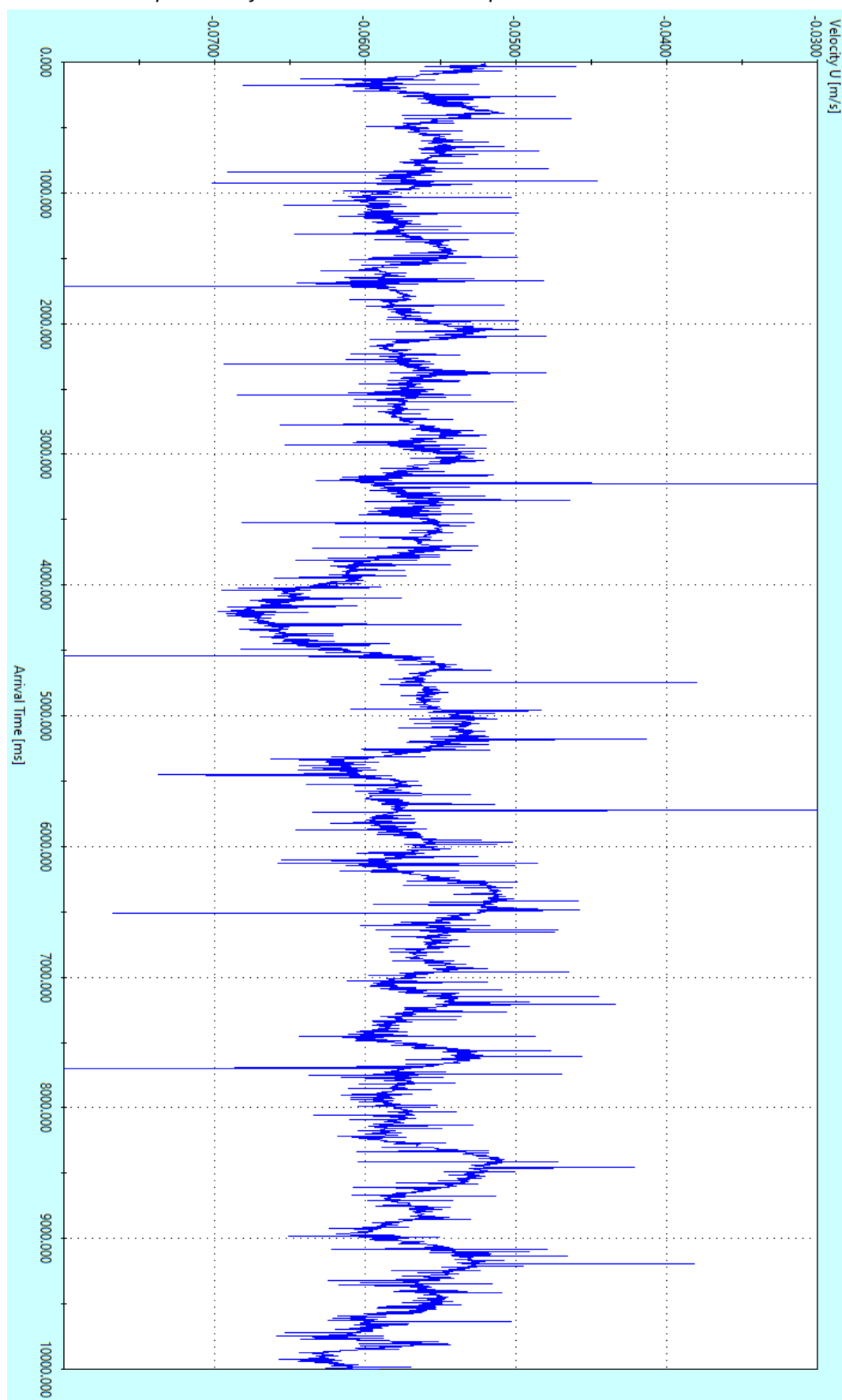
## 7 PŘÍLOHY

*Příloha č. 1a: Turbulentní proudění při frekvenci 2 Hz v bodě č. 20 ze dne 13. 06. 2019 zachycené pomocí softwaru BSA Flow v.6.60 v průběhu dvou sekund*

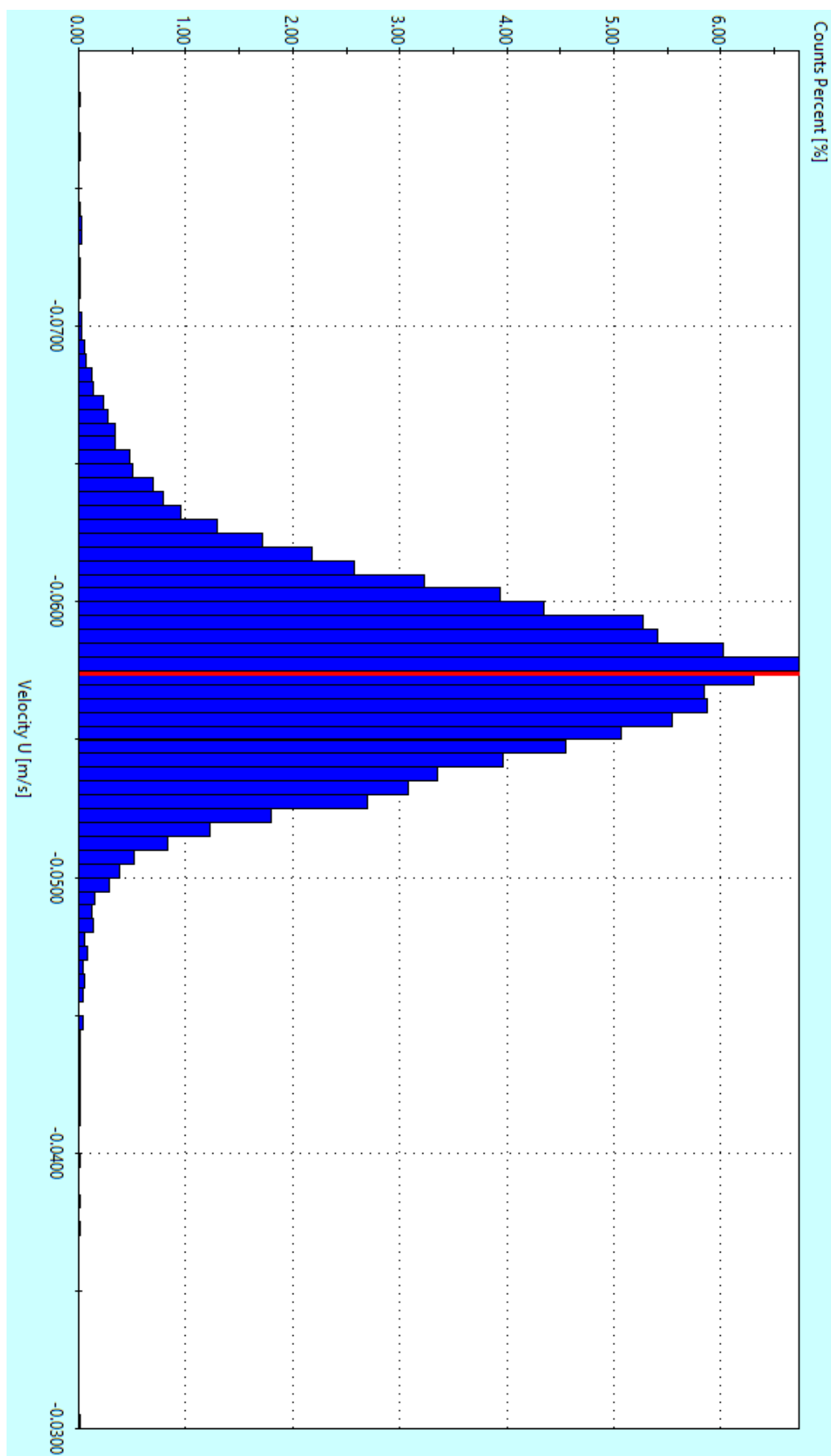




Příloha č. 1b: Č Turbulentní proudění při frekvenci 2 Hz v bodě č. 20 ze dne 13. 06. 2019 zachycené pomocí softwaru BSA Flow v.6.60 v průběhu deseti sekund



Příloha č. 2: Histogram rychlostí při frekvenci 2 Hz v bodě č. 20 ze dne 13. 06. 2019 zachycený pomocí softwaru BSA Flow v.6.60



Příloha č. 3: Výstupní datová tabulka pro měření ze dne 13. 06. 2019 při 1,8 Hz

<b>X [mm]</b>	<b>Y [mm]</b>	<b>Čas [s]</b>	<b>Počet dat [#]</b>	<b>Průměrný datový tok [#/s]</b>	<b>Úspěšnost [%]</b>	<b>Střední hodnota rychlosti [m/s]</b>	<b>Střední kvadratická odchylka rychlosti [m/s]</b>	<b>Proud fotonásobiče [uA]</b>
-10,00	-20,00	9:31:00	10253	341,85	97,77	-0,051	0,0035	267
0,00	-20,00	9:31:36	9935	331,20	98,37	-0,049	0,0031	263
10,00	-20,00	9:32:11	7858	261,99	98,43	-0,051	0,0035	246
20,00	-10,00	9:32:47	8870	295,78	97,81	-0,051	0,0034	248
10,00	-10,00	9:33:23	9882	329,51	97,95	-0,050	0,0035	253
0,00	-10,00	9:33:58	10215	340,61	97,88	-0,050	0,0033	257
-10,00	-10,00	9:34:34	10267	342,35	98,04	-0,051	0,0032	260
-20,00	-10,00	9:35:10	10208	340,33	98,31	-0,050	0,0033	254
-20,00	0,00	9:35:46	10559	352,03	98,31	-0,052	0,0034	259
-10,00	0,00	9:36:21	10224	340,90	98,18	-0,053	0,0034	259
0,00	0,00	9:36:57	9769	325,70	98,15	-0,051	0,0033	243
10,00	0,00	9:37:33	9737	324,66	98,19	-0,051	0,0031	238
20,00	0,00	9:38:08	9786	326,27	97,75	-0,051	0,0033	236
20,00	10,00	9:38:44	9716	323,95	97,92	-0,051	0,0035	238
10,00	10,00	9:39:20	9706	323,66	97,88	-0,051	0,0031	239
0,00	10,00	9:39:55	9777	326,01	98,09	-0,051	0,0028	246
-10,00	10,00	9:40:31	9910	330,43	98,38	-0,051	0,0034	256
-20,00	10,00	9:41:07	9932	331,17	98,13	-0,051	0,0034	258
-10,00	20,00	9:41:43	10024	334,23	98,14	-0,051	0,0032	246
0,00	20,00	9:42:18	9798	326,67	97,96	-0,050	0,0033	245
10,00	20,00	9:42:54	9677	322,67	98,23	-0,051	0,0032	237

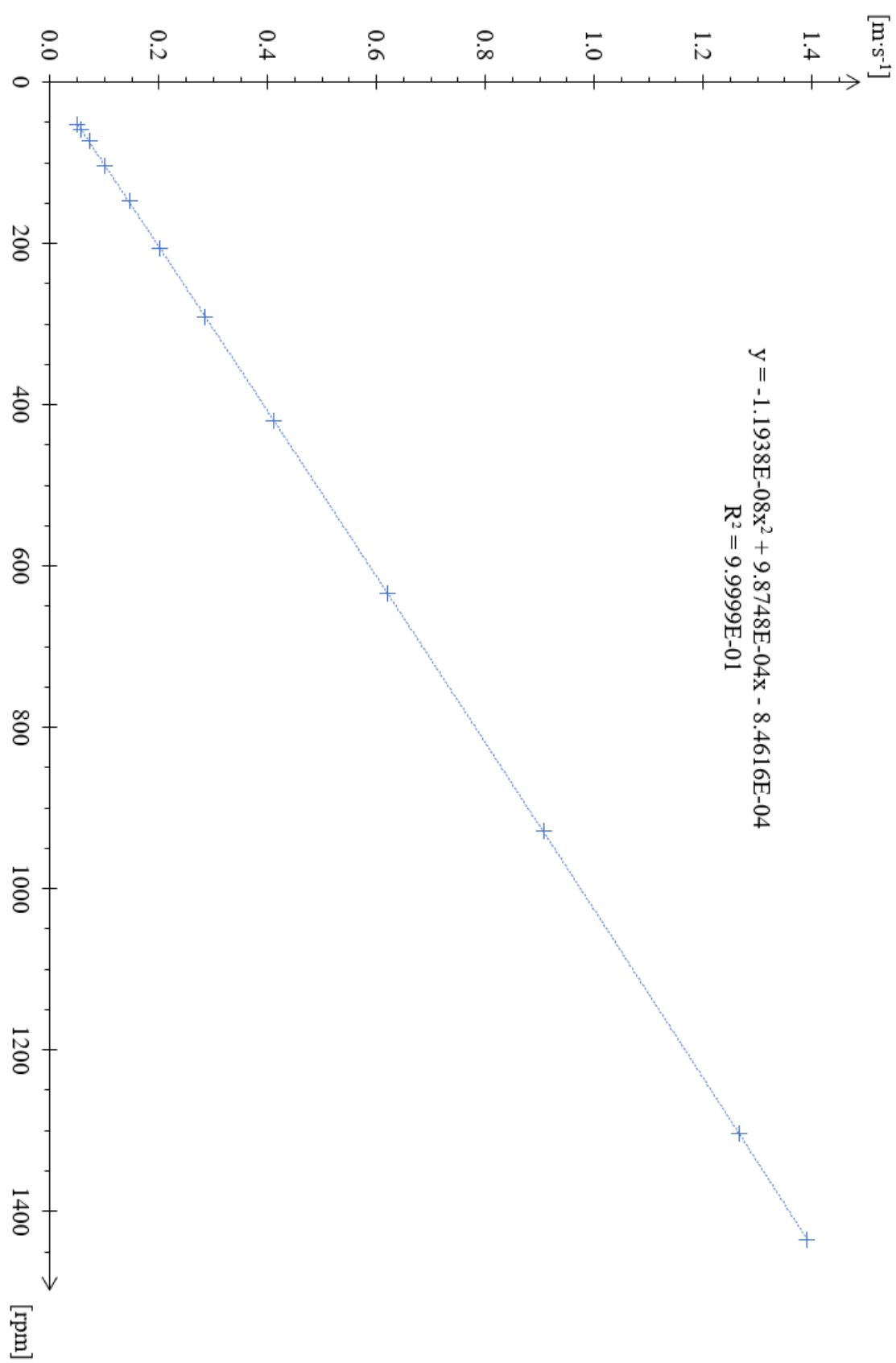
*Příloha č. 4: Zápis otáček a teplot ze dne 13. 06. 2019*

frekvence [Hz]	<b>1.8</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	52.31	52.3	52.24	52.28	52.26	52.278
teplota [°C]	23.9	23.4	23.2	23.1	23.2	23.36
frekvence [Hz]	<b>2.5</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	73.29	73.26	73.31	73.25	73.28	73.278
teplota [°C]	22.4	21.1	21.8	21.6	21.4	21.66
frekvence [Hz]	<b>5.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	147.98	147.97	147.88	148.05	147.95	147.966
teplota [°C]	21.1	21.2	21.2	21	21.4	21.18
frekvence [Hz]	<b>10.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	291.84	291.89	291.78	291.82	291.94	291.854
teplota [°C]	21.3	21.3	21.4	21.2	21.5	21.34
frekvence [Hz]	<b>23.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	634.59	634.56	634.36	634.42	634.62	634.51
teplota [°C]	22	22.1	22	21.9	22	22
frekvence [Hz]	<b>48.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	1314.06	1309.09	1297.29	1295.35	1298.64	1302.886
teplota [°C]	22.6	22.8	23.6	23.7	23.7	23.28
frekvence [Hz]	<b>53.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	1438.2	1437.6	1431.64	1434.78	1436.24	1435.692
teplota [°C]	23.4	22.8	22.9	23	22.7	22.96
frekvence [Hz]	<b>35.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	927.53	928.6	928.28	928.14	927.88	928.086
teplota [°C]	22	21.8	21.8	21.4	21.7	21.74
frekvence [Hz]	<b>15.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	417.69	421.36	422.49	420.94	421.14	420.724
teplota [°C]	21.3	21.6	21.4	21.4	21.4	21.42
frekvence [Hz]	<b>7.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	205.61	206.52	206.42	205.98	206.22	206.15
teplota [°C]	21.9	21.3	21.3	21.9	21.6	21.6
frekvence [Hz]	<b>3.5</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	103.02	103.46	103.49	103.28	103.44	103.338
teplota [°C]	21	21.5	21.8	21.7	21.6	21.52
frekvence [Hz]	<b>2.0</b>					<b>průměr</b>
otáčky [rpm]	58.51	58.48	58.57	58.51	58.56	58.526
teplota [°C]	22	22.1	22.1	22.1	22.2	22.1

*Příloha č.5: Srovnání středních hodnot celého a redukovaného rychlostního pole ze dne 13. 06. 2019  
při vybraných frekvencích*

frekvence [Hz]	1.8			2.0		
Bod	X [mm]	Y [mm]	Rychlost [m/s]	X [mm]	Y [mm]	Rychlost [m/s]
1	-10,00	-20,00	-0.051	-10,00	-20,00	-0.057
2	0,00	-20,00	-0.049	0,00	-20,00	-0.055
3	10,00	-20,00	-0.051	10,00	-20,00	-0.057
4	20,00	-10,00	-0.051	20,00	-10,00	-0.057
5	10,00	-10,00	-0.050	10,00	-10,00	-0.057
6	0,00	-10,00	-0.050	0,00	-10,00	-0.057
7	-10,00	-10,00	-0.051	-10,00	-10,00	-0.058
8	-20,00	-10,00	-0.050	-20,00	-10,00	-0.059
9	-20,00	0,00	-0.052	-20,00	0,00	-0.059
10	-10,00	0,00	-0.053	-10,00	0,00	-0.058
11	0,00	0,00	-0.051	0,00	0,00	-0.057
12	10,00	0,00	-0.051	10,00	0,00	-0.057
13	20,00	0,00	-0.051	20,00	0,00	-0.057
14	20,00	10,00	-0.051	20,00	10,00	-0.058
15	10,00	10,00	-0.051	10,00	10,00	-0.058
16	0,00	10,00	-0.051	0,00	10,00	-0.058
17	-10,00	10,00	-0.051	-10,00	10,00	-0.058
18	-20,00	10,00	-0.051	-20,00	10,00	-0.058
19	-10,00	20,00	-0.051	-10,00	20,00	-0.058
20	0,00	20,00	-0.050	0,00	20,00	-0.057
21	10,00	20,00	-0.051	10,00	20,00	-0.057
		<b>V<sub>CELK.</sub></b>	-0.05086		<b>V<sub>CELK.</sub></b>	-0.05748
		<b>V<sub>KŘÍŽ</sub></b>	-0.05089		<b>V<sub>KŘÍŽ</sub></b>	-0.05722
		<b>Odchylka [%]</b>	<b>0.06242</b>		<b>Odchylka [%]</b>	<b>-0.44187</b>

Příloha č. 6: Graf závislosti rychlosti na otáčkách ze dne 13. 06. 2019

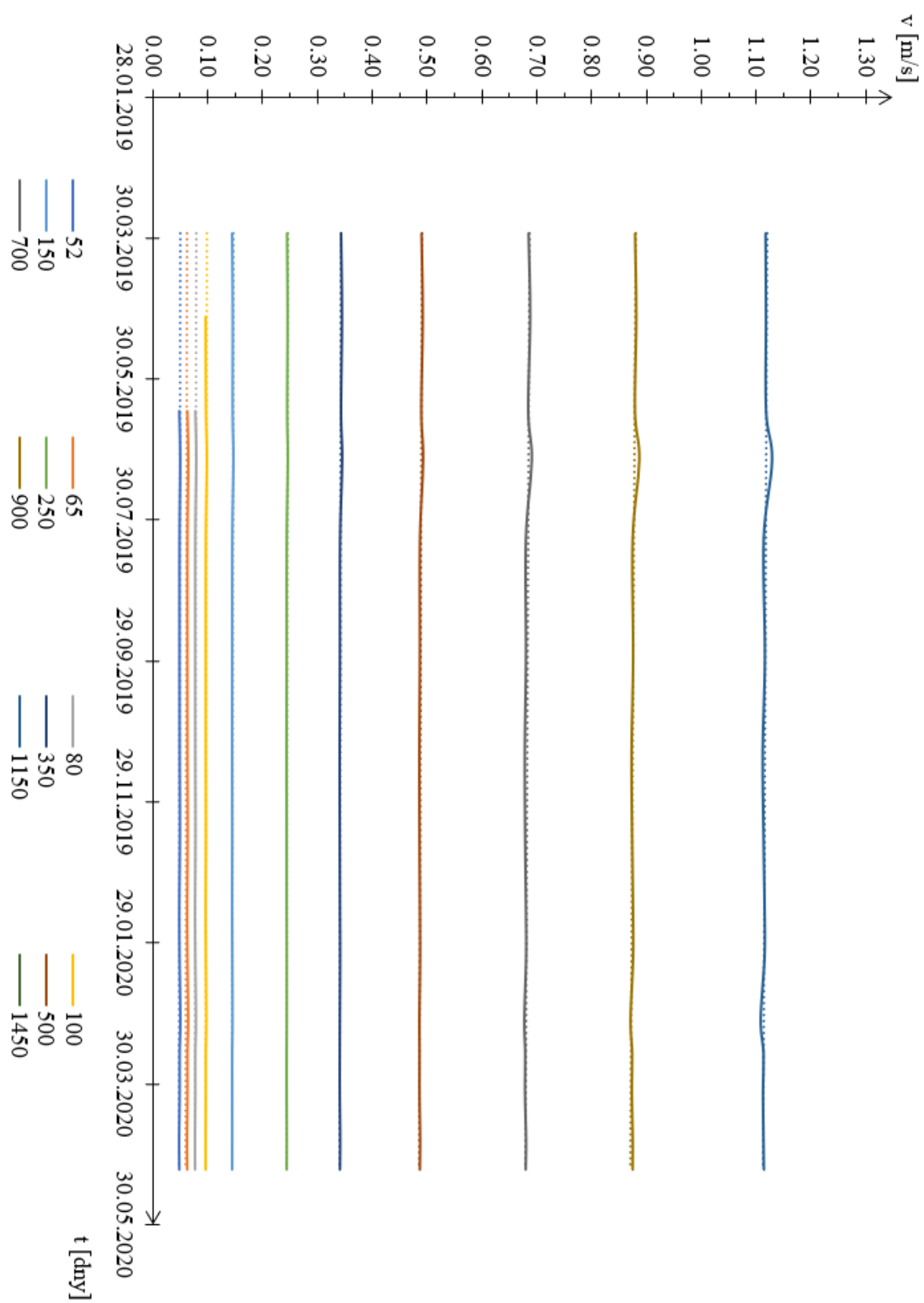


Příloha č. 7: Referenční hodnoty rychlosti

	28.03. 2019	03.05. 2019	13.06. 2019	04.07. 2019	07.08. 2019	27.09. 2019	07.11. 2019	13.12. 2019
<b>otáčky</b>	<b>průměrné hodnoty rychlosti</b>							
<b>[rpm]</b>	<b>[m·s<sup>-1</sup>]</b>							
52	-	-	0.0505	0.0513	0.0507	0.0507	0.0508	0.0510
65	-	-	0.0633	0.0642	0.0634	0.0633	0.0634	0.0636
80	-	-	0.0781	0.0791	0.0781	0.0780	0.0780	0.0782
100	-	0.0973	0.0978	0.0989	0.0976	0.0975	0.0975	0.0977
150	0.1461	0.1472	0.1470	0.1484	0.1464	0.1462	0.1461	0.1463
250	0.2449	0.2466	0.2453	0.2473	0.2440	0.2436	0.2433	0.2435
350	0.3434	0.3455	0.3433	0.3460	0.3413	0.3410	0.3403	0.3405
500	0.4904	0.4929	0.4899	0.4938	0.4871	0.4868	0.4857	0.4860
700	0.6852	0.6877	0.6845	0.6903	0.6809	0.6811	0.6792	0.6797
900	0.8785	0.8805	0.8782	0.8861	0.8741	0.8750	0.8722	0.8731
1150	1.1181	1.1188	1.1190	1.1300	1.1147	1.1169	1.1128	1.1143
1450	1.4026	1.4006	1.4059	1.4213	1.4021	1.4065	1.4006	1.4032

	14.01. 2020	04.02. 2020	02.03. 2020	17.03. 2020	03.04. 2020	23.04. 2020	06.05. 2020
<b>otáčky</b>	<b>průměrné hodnoty rychlosti</b>						
<b>[rpm]</b>	<b>[m·s<sup>-1</sup>]</b>						
52	0.0504	0.0507	0.0514	0.0508	0.0508	0.0503	0.0505
65	0.0631	0.0634	0.0641	0.0634	0.0634	0.0630	0.0632
80	0.0778	0.0780	0.0787	0.0780	0.0780	0.0777	0.0778
100	0.0973	0.0976	0.0981	0.0975	0.0975	0.0973	0.0973
150	0.1461	0.1464	0.1468	0.1462	0.1462	0.1462	0.1461
250	0.2436	0.2439	0.2439	0.2434	0.2434	0.2439	0.2436
350	0.3410	0.3413	0.3408	0.3406	0.3405	0.3414	0.3410
500	0.4869	0.4872	0.4858	0.4861	0.4860	0.4873	0.4867
700	0.6810	0.6813	0.6785	0.6798	0.6795	0.6811	0.6806
900	0.8747	0.8749	0.8703	0.8732	0.8726	0.8741	0.8739
1150	1.1162	1.1162	1.1091	1.1144	1.1134	1.1142	1.1149
1450	1.4052	1.4047	1.3940	1.4030	1.4013	1.4007	1.4028

Příloha č. 8: Graf závislosti rychlosti na čase při referenčních otáčkách



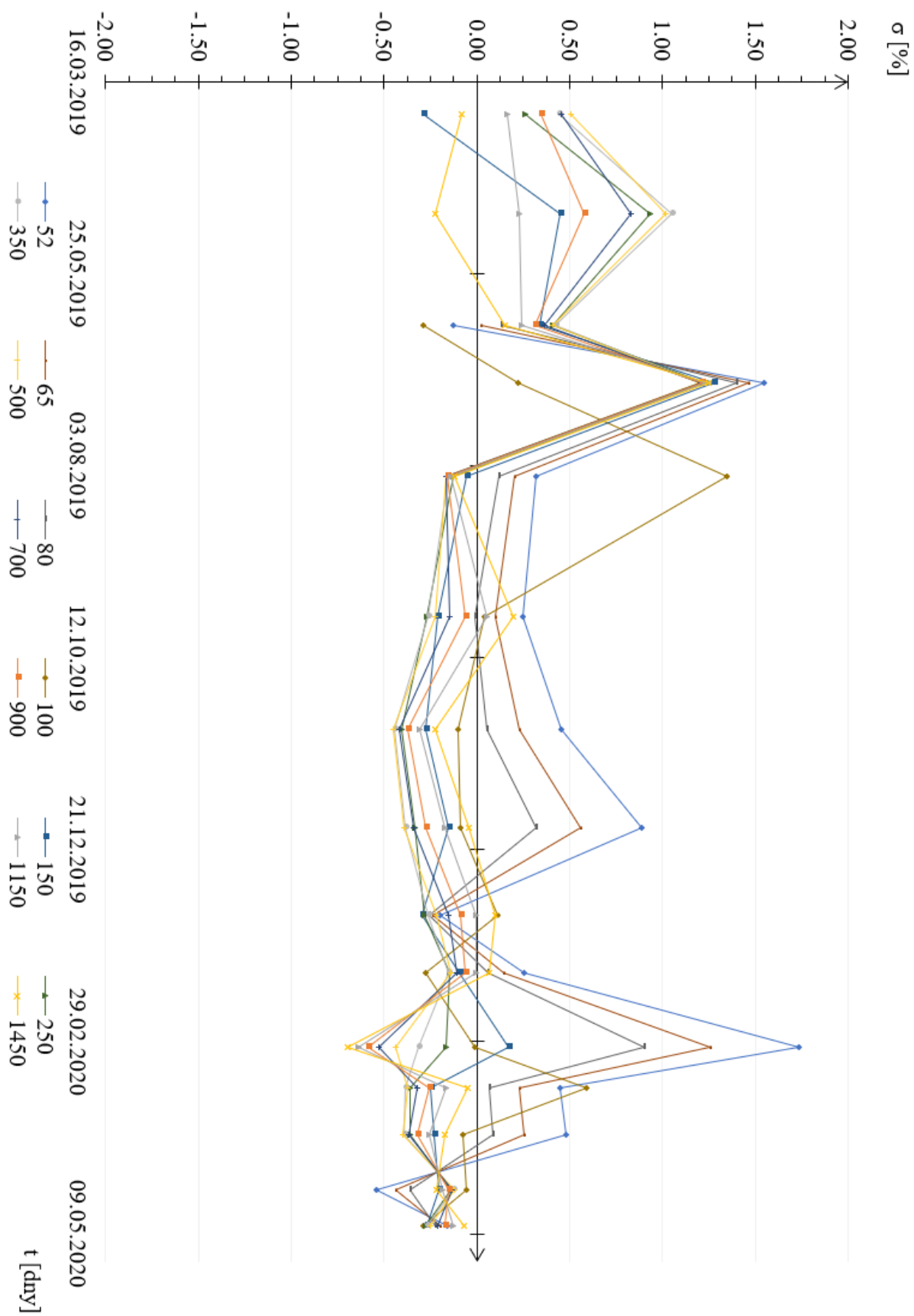


*Příloha č. 9: Tabulka odchylek od střední hodnoty jednotlivých měření*

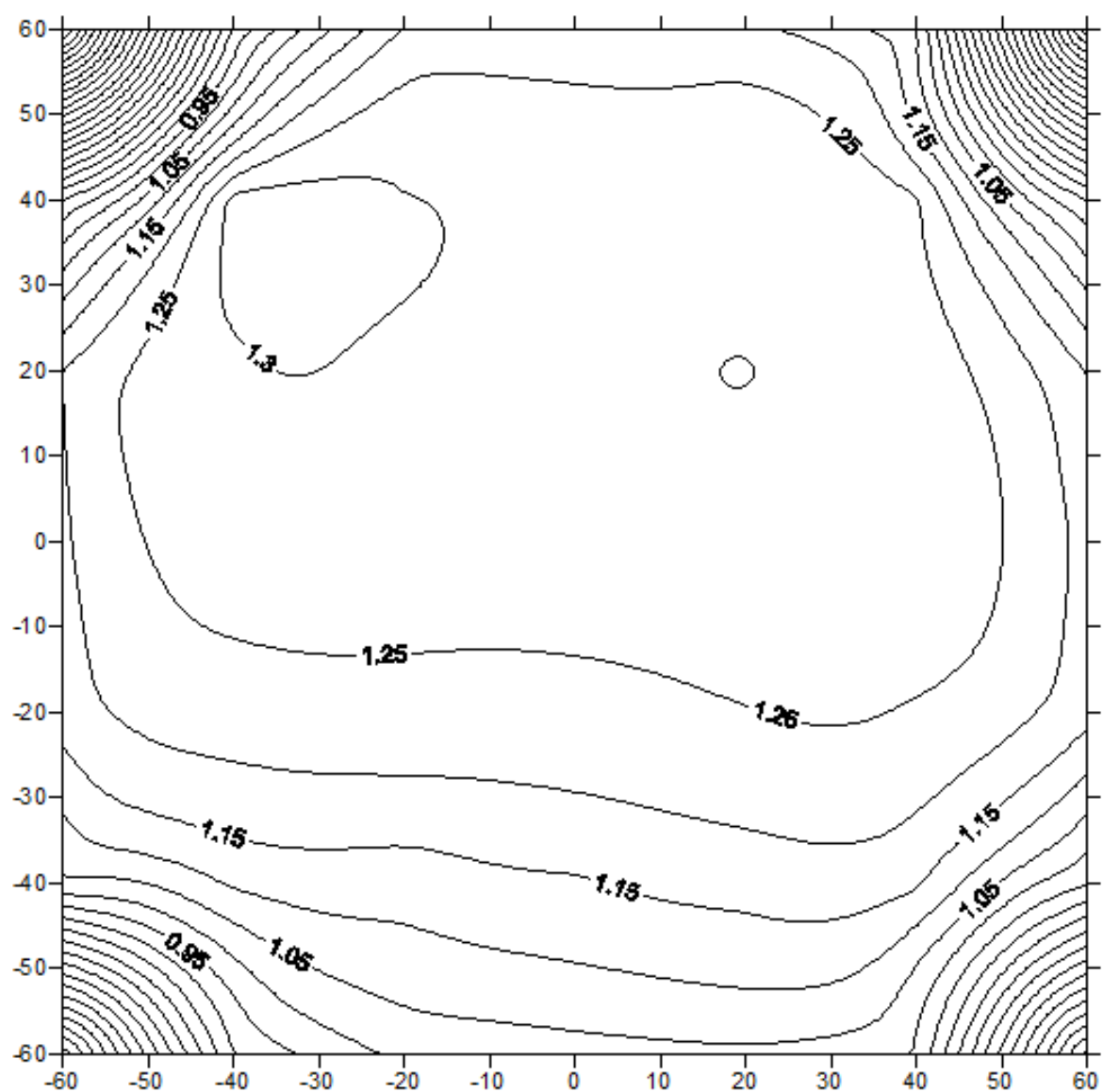
52	-	-	-0.1244	1.5490	0.3206	0.2459	0.4578	0.8878
65	-	-	0.0228	1.4630	0.2039	0.0977	0.2265	0.5593
80	-	-	0.1311	1.3991	0.1171	-0.0105	0.0552	0.3162
100	-	-0.2876	0.2225	1.3444	0.0427	-0.1006	-0.0906	0.1094
150	-0.2903	0.4474	0.3367	1.2737	-0.0541	-0.2089	-0.2772	-0.1544
250	0.2626	0.9362	0.4087	1.2224	-0.1261	-0.2657	-0.4070	-0.3362
350	0.4449	1.0524	0.4214	1.2052	-0.1519	-0.2618	-0.4444	-0.3867
500	0.5100	1.0171	0.4070	1.1986	-0.1646	-0.2219	-0.4487	-0.3886
700	0.4577	0.8299	0.3654	1.2027	-0.1642	-0.1456	-0.4196	-0.3417
900	0.3432	0.5796	0.3138	1.2126	-0.1560	-0.0589	-0.3750	-0.2727
1150	0.1615	0.2274	0.2430	1.2284	-0.1411	0.0562	-0.3095	-0.1727
1450	-0.0845	-0.2244	0.1532	1.2500	-0.1197	0.1993	-0.2239	-0.0425

52	-0.2007	0.2566	1.7362	0.4471	0.4784	-0.5416	-0.1595
65	-0.2345	0.1444	1.2572	0.2268	0.2543	-0.4350	-0.1969
80	-0.2580	0.0620	0.8985	0.0642	0.0885	-0.3560	-0.2238
100	-0.2759	-0.0075	0.5878	-0.0734	-0.0527	-0.2888	-0.2457
150	-0.2916	-0.0939	0.1723	-0.2468	-0.2332	-0.2026	-0.2700
250	-0.2835	-0.1473	-0.1653	-0.3603	-0.3584	-0.1422	-0.2772
350	-0.2604	-0.1554	-0.3155	-0.3853	-0.3941	-0.1243	-0.2687
500	-0.2171	-0.1421	-0.4356	-0.3729	-0.3973	-0.1215	-0.2470
700	-0.1535	-0.1072	-0.5258	-0.3230	-0.3680	-0.1337	-0.2121
900	-0.0872	-0.0646	-0.5850	-0.2582	-0.3236	-0.1531	-0.1744
1150	-0.0025	-0.0065	-0.6400	-0.1677	-0.2587	-0.1818	-0.1255
1450	0.1008	0.0669	-0.6928	-0.0522	-0.1739	-0.2194	-0.0654

Příloha č. 10: Graf procentuálních odchylek měření od střední hodnoty



Příloha č. 11: Izotachový graf ze dne 21. 03. 2019 při 48 Hz, kde byl posuzován celý měrný prostor



Příloha č. 12: 3D graf ze dne 21. 03. 2019 při 48 Hz, kde byl posuzován celý měrný prostor

